

Estudio genético preliminar de la mineralización de Pb-Fe presente en muestras cretácicas de núcleos de perforación del pozo UBL0809 (municipio de Ubalá, departamento de Cundinamarca)

Autor

Brayam David Quintero Rios

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Ph.D. Petrografía y Geoquímica de procesos ígneas y metamórficas

Codirector

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

MS.C. en Yacimientos minerales

Grupo De Investigación En Geología Básica Y Aplicada (GIGBA)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios que siempre me ha dado fuerzas para seguir adelante, que me ha brindado oportunidades que no esperaba y me ha dado la sabiduría para éste y todos los logros que he alcanzado.

A mis padres que me han enseñado que el amor por un hijo no tiene límites y siempre he sentido su apoyo incondicional.

A mi novia Katia que me enseñó a valorar lo realmente importante en la vida.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por brindar las mejores condiciones para desarrollar una formación integral.

A la Litoteca Nacional que me recibió como practicante, me prestó sus instalaciones y allí se inició este proyecto de investigación.

Al profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa por dirigir esta investigación, por sus aportes geológicos y su contagioso entusiasmo por la ciencia.

Al geólogo MSc. Andrés Mauricio Cáceres por proponer y asesorar este proyecto como codirector.

A los docentes Diego Ibáñez, Ana Milena Cardozo y Georgina Guzmán por su acompañamiento durante la estancia en la Litoteca Nacional.

Al geólogo Rigo Ramírez por sus palabras de aliento y el préstamo de su microscopio óptico utilizado en esta investigación.

A los compañeros Miguel Orjuela y Hector Ocampo que con sus consejos motivaron la culminación de este proyecto de investigación.

A mis familiares y amigos que de distintas formas me brindaron su apoyo.

Tabla de contenido

Introducción	17
1. Objetivos	18
1.1. Objetivo General	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. Generalidades del área de estudio	19
2.1. Localización geográfica	19
2.2. Aspectos geográficos y geomorfológicos	19
3. Marco geológico	21
3.1. Marco geológico regional	21
3.2. Marco geológico local	24
4. Marco Tectónico y Estructural	28
4.1. Fallas	28
4.2. Pliegues	30
5. Metodología	31
5.1. Fase de planeación	31
5.2. Fase de ejecución	34
5.3. Fase de resultados	37
6. Resultados	38
6.1. Litologías	38
6.2. Columna estratigráfica	45
6.3. Eventos hidrotermales	48
6.4. Asociaciones minerales	53
6.5. Otras observaciones en el microscopio óptico	61

6.6. Microscopía electrónica de barrido y espectrometría de dispersión de energía (SEM+EDS)	65
6.7. Difracción de rayos X (DRX)	74
6.8. Historia hidrotermal	77
6.9. Paragénesis mineral	78
7. Discusión	80
7.1. Similitudes del depósito Pb-Fe con los MVT	80
7.2. El rol de la presión–disolución en el depósito	81
8. Conclusiones	83
Recomendaciones	84
Referencias Bibliográficas	85

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Localización del pozo de perforación UBL0809. Las coordenadas del pozo son proyectadas sobre un fragmento tomado del mapa geológico del CEOR, publicado por Terraza, y otros, (2008).....	19
<i>Figura 2.</i> Estratigrafía del Cretácico inferior para el área del CEOR. El pozo de perforación fue extraído de la Fm. Ubalá (señalada en verde) de edad Berriasiano. Figura tomada de Silva, Mantilla, & Terraza (2010).....	21
<i>Figura 3.</i> Sección tipo de la Fm. Ubalá, levantada cerca al Río Chivor (Vereda Las Mercedes). Tomada de Terraza, y otros (2013).	27
<i>Figura 4.</i> Formato utilizado para la descripción de los núcleos del pozo de perforación	32
<i>Figura 5.</i> Formato utilizado para levantar la columna estratigráfica del pozo de perforación UBL0809.....	33
<i>Figura 6.</i> Láminas pulidas sobre las cuales se realizó la microscopia óptica de luz transmitida. Sobre la lámina pulida UBL0809-L1 se analizaron los puntos de SEM-EDS.	35
<i>Figura 7.</i> Tabletillas de roca que quedaron de la preparación de las láminas pulidas (testigos).	36
<i>Figura 8.</i> Fotografías de núcleos con metasomatita del pozo UBL0809. A) Gasterópodos recristalizados a ankerita-siderita. B) Fragmentos de bivalvos recristalizados a ankerita-siderita. C) y D) Estiolitos horizontales. D) y F) Texturas resultantes de procesos de presión-disolución.	39
<i>Figura 9.</i> Fotografías de un núcleo donde se observa el conglomerado con textura clasto soportada. Sobre la esquina inferior izquierda se observan fragmento de bioclastos en la matriz.	40
<i>Figura 10.</i> Fotografías de un núcleo que presenta relleno hidrotermal de carbonatos en la matriz del conglomerado.....	41

- Figura 11. Fotografías sobre núcleos mostrando los clastos que conforman el conglomerado. A) Clasto de lodolita gris verdosa B) Clasto de sílice moteado con finas vetillas de pirita. C) Clastos de cuarzo lechoso..... 41
- Figura 12.* Fotografías tomadas a núcleos sobre el Conglomerado. A) Se observa un clasto de lodolita gris verdosa alterando a sílice en sus bordes B) clasto de carbonato con galena en su interior..... 41
- Figura 13.* Fotografías de núcleos del pozo UBL0809. A) Fotografía de lodolita yesífera. B) Contacto inferior de la lodolita yesífera con el conglomerado, mostrando desplazamiento entre las dos capas. 42
- Figura 14.* Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 sobre niveles arcillolíticos. A) Arcillolita negra bien cementada. B) Lente de arcillolita entre el conglomerado. C) Contacto transicional entre la arcillolita y el conglomerado..... 43
- Figura 15.* Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 mostrando en A, B y C los bioclastos en caliza con textura wackestone..... 44
- Figura 16.* Fotografía de núcleo del pozo UBL0809 mostrando un relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena-pirita-cuarzo. 44
- Figura 17. Fotografías de la limonita-gossan en núcleos del pozo UBL0809.A) Textura porosa de óxidos con anglesita en color gris B). Colores anaranjados fuertes de óxidos hidróxidos..... 45
- Figura 18.* Columna estratigráfica del pozo de perforación UBL0809. 47
- Figura 19.* Fotografías de núcleos con mineralización Pb -Fe de la etapa 1A en la metasomatita. A) Relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena. B) Mineralización diseminada de siderita-ankerita-galena-pirita. C)Mineralización diseminada de ankerita-siderita-galena. D) Textura de reemplazamiento compuesto por siderita-ankerita-galena-cuarzo..... 49

Figura 20. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 con mineralización de la etapa 1B. A) Bolsadas de ankerita-cuarzo B) Textura en drusa de ankerita-cuarzo. C) Cristal piramidal de cuarzo sobre ankerita romboédrica. D) Agregado de ankerita en silla de montar. E) Cristal de ankerita. 50

Figura 21. Fotografías de núcleo del pozo UBL0809. En las figuras A y B se observan vetillas de cuarzo-ankerita-siderita-galena de la etapa 2..... 51

Figura 22. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 mostrando actividad hidrotermal sobre el conglomerado. A) Vetilla de ankerita-siderita-cuarzo. B) Relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena. C) vetillas de ankerita-siderita-cuarzo atravesando una veta de ankerita-siderita. 52

Figura 23. Fotografías de núcleos con minerales producto de alteración supérgena: A) Anglesita. B) Malaquita. 53

Figura 24. Fotografía de la lámina UBL0809-L1 mostrando sombras de crecimiento sobre cuarzo detrítico. 54

Figura 25. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando sid-ank-cz de la asociación 1A..... 55

Figura 26. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando gn-ank-dol de la asociación 1A..... 56

Figura 27. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando cuarzo hexagonal de la asociación 1A, con extinción recta y bordes alterados por carbonatos..... 56

Figura 28. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando cristales romboédricos de dolomita de la asociación 1A..... 56

Figura 29. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando dolomita de la asociación 1A con lamelas de macla paralelas a la diagonal mayor de la exfoliación romboédrica, acompañado de siderita y cuarzo. 57

Figura 30. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando lamelas de macla en enrejado de calcita de la asociación 1A. 57

Figura 31. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando una vetilla de pirita. .. 57

Figura 32. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L5 mostrando cz-ank de la asociación 1B.... 58

Figura 33. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L5 mostrando ankerita de la asociación 1B.. 58

Figura 34. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L3 mostrando una vetilla de la etapa 2 con cz-ank-gn. 59

Figura 35. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L3 mostrando ang producto de alteración de gn. 60

Figura 36. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando anglesita producto de alteración de la galena. 60

Figura 37. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando pirita alterando en sus bordes a goethita..... 61

Figura 38. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando un clasto arcilloso del conglomerado..... 62

Figura 39. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando finas vetillas de pirita dentro de un clasto arcilloso del conglomerado..... 62

Figura 40. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando un carbonato de la matriz alterando..... 62

<i>Figura 41.</i> Fotografía sobre la lámina UBL00809-L4 mostrando la textura generada por procesos de presión – disolución.	64
<i>Figura 42.</i> Imagen de electrones secundarios para la siderita.	66
<i>Figura 43.</i> Comparación de los espectros de dispersión para la siderita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).	66
<i>Figura 44.</i> Imagen de electrones secundarios para la ankerita.	67
<i>Figura 45.</i> Comparación de los espectros de dispersión para la ankerita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).	67
<i>Figura 46.</i> Imagen de electrones secundarios para el cuarzo.	68
<i>Figura 47.</i> Comparación de los espectros de dispersión para el cuarzo. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).	68
<i>Figura 48.</i> Imagen de electrones secundarios para la pirita.	69
<i>Figura 49.</i> Comparación de los espectros de dispersión para la pirita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).	69
<i>Figura 50.</i> Imagen de electrones secundarios para la galena.	70
<i>Figura 51.</i> Comparación de los espectros de dispersión para la galena. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).	70
<i>Figura 52.</i> Imagen de electrones secundarios para la anglesita.....	71
<i>Figura 53.</i> Espectro de dispersión de la anglesita.	71
<i>Figura 54.</i> Imagen de electrones secundarios para la materia orgánica.	72
<i>Figura 55.</i> Espectro de dispersión para la materia orgánica.	72
<i>Figura 56.</i> Imagen de electrones secundarios sobre un punto con elementos metálicos.	73
<i>Figura 57.</i> Espectro de dispersión sobre punto con elementos metálicos.	73

<i>Figura 58.</i> Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L1-DRX1.	74
<i>Figura 59.</i> Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L2-DRX1.	75
<i>Figura 60.</i> Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L3-DRX1.	76
<i>Figura 61.</i> Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L5-DRX1.	76
<i>Figura 62.</i> Secuencia paragenética de los minerales hidrotermales que interactuaron con rocas cretácicas perforadas en el pozo UBL0809	79

Apéndices

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede ser visualizados en la Base de Datos de la Biblioteca UIS.

Apéndice A. Resultados de la microscopia electrónica de barrido

Apéndice B. Resultados de la difracción de rayos x

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO GENÉTICO PRELIMINAR DE LA MINERALIZACIÓN DE Pb-Fe PRESENTE EN MUESTRAS CRETÁICAS DE NÚCLEOS DE PERFORACIÓN DEL POZO UBL0809 (MUNICIPIO DE UBALÁ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA) *.

AUTOR: Quintero Rios, Brayam David**.

PALABRAS CLAVE: Paragénesis, hidrotermal, galena, siderita, ankerita, MVT.

DESCRIPCIÓN:

La mineralización de Pb-Fe encontrada en el pozo de perforación UBL0809 almacenado en la Litoteca Nacional de Colombia que fue extraído en el municipio de Ubalá sobre la Formación Ubalá de edad Berriasiana, se encuentra asociada a un primer evento hidrotermal que precipitó de forma diseminada ankerita, siderita, galena y menores cantidades de cuarzo, dolomita, calcita, piritita y calcopiritita. Esta mineralización mena de Pb (galena) y de Fe (siderita) presenta una longitud vertical de nueve metros en el pozo objeto de estudio, sin embargo, la ankerita que también es mena de Fe, se encuentra sobre 39m de longitud vertical en el pozo en forma diseminada y de bolsadas asociada a un segundo estadio del primer evento hidrotermal que contó con condiciones favorables para el crecimiento de cristales de ankerita y cuarzo en agregados tipo drusa y peineta.

Actividad hidrotermal posterior ocurrió en un segundo evento que formó vetillas de hasta un centímetro de espesor compuestas por cuarzo, ankerita, siderita y menores cantidades de galena. Seguidamente, debido a la percolación de fluidos meteóricos, se produce alteración supérgena formando la asociación anglesita, goethita y malaquita a partir de los minerales formados en las etapas anteriores.

Por último, los resultados de esta investigación mostraron que existen similitudes composicionales, estratigráficas, dimensionales y litológicas entre la mineralización estudiada y las reportados en la bibliografía especializada para los depósitos Mississippi Valley Type.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa, Geólogo, PhD.

ABSTRACT

TITLE: PRELIMINARY GENETIC STUDY OF THE Pb-Fe MINERALIZATION PRESENT IN CRETACIC SAMPLES ON DRILLING CORES FROM UBL0809 WELL (MUNICIPALITY OF UBALÁ, DEPARTMENT OF CUNDINAMARCA)*.

AUTHOR: Quintero Rios, Brayam David**.

KEYWORDS: Paragenesis, hydrothermal, galena, siderite, ankerite, MVT.

DESCRIPTION:

The Pb-Fe mineralization in the UBL0809 drilling well stored in the Litoteca Nacional of Colombia that was extracted in the municipality of Ubalá city, on the Ubalá Formation of Berriasiana, is associated with a hydrothermal event that precipitated in disseminated form in the ankerite, siderite, galena rock and in smaller quantities quartz, dolomite, calcite, pyrite-chalcopyrite. The disseminated mineralization of the Pb (galena) and Fe (siderite) ores are nine meters long in the well object of study, nevertheless, the ankerite is a Fe ore too, extends it over a vertical length of 39m in the well, is also found in bags and disseminated, associated with a second stage of this first hydrothermal event, with favorable conditions for ankerite and quartz crystals growth in drusen or comb aggregation type.

Subsequent hydrothermal activity occurred in a second event that formed veins up to a centimeter thick composed of quartz, ankerite, siderite and smaller amounts of galena. Later, thanks to meteorological fluids percolation, a supergenic alteration occurs that generates the anglesite, goethite, malachite association from the minerals formed in the previous stages.

Finally, the results of this research showed that there are compositional, stratigraphic, dimensional and lithological similarities between the mineralization studied and those reported in the specialized literature for Mississippi Valley Type deposits.

* Research project

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa Geologist, PhD.

Introducción

Las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia tienen gran potencial de contener mineralizaciones económicas, entre las cuales se encuentran las mineralizaciones de metales base y de hierro, sobre éstas existen reportes muy antiguos de manifestaciones de sulfuros de Pb (Fisanne 1881 en Sarmiento 2002) (Lopez, 1953) (Mendoza, 1983) y carbonatos de hierro (Cruz & Camacho, 1971), así como publicaciones más recientes que confirman dicho potencial (Sarmiento, 2002).

En la provincia del Guavio, región donde se encuentra el municipio de Ubalá, se han realizado trabajos de exploración en búsqueda de yacimientos de plomo, hierro y cobre, dejando evidencia del atractivo minero de la región. Piezas clave de uno de estos estudios (no publicados), fueron 35 pozos de perforación extraídos en el sector de Ubalá y que finalmente fueron entregados en la Litoteca Nacional (Parque Tecnológico de Guatiguará-Piedecuesta) para ser preservados y almacenados.

Para el desarrollo de esta investigación se escogió entre los 35 pozos de perforación, el UBL0809, con el objetivo de caracterizar los minerales mena y gangas presentes de forma diseminada en varios de los núcleos, para proponer un modelo genético preliminar de las mineralizaciones de metales base y de hierro observadas en el municipio de Ubalá sobre sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar un estudio genético preliminar de la mineralización Pb-Fe presentes en muestras Cretácicas de núcleos de perforación del Pozo UBL0809 (Municipio de Ubalá-Cundinamarca).

1.2. Objetivos Específicos

Realizar una búsqueda y un análisis de la información geológica disponible sobre el área donde se localiza el pozo de perforación UBL0809 objeto de estudio, con el propósito de su contextualización desde el punto de vista de su geología regional y local.

Analizar y describir macroscópicamente los núcleos de perforación para identificar las variedades litológicas presentes y la tipología de las alteraciones hidrotermales que les han afectado.

Caracterizar mediante técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica y difracción de rayos X las alteraciones hidrotermales y la mena asociada, para fines de establecer sus contextos paragenéticos.

Establecer a la luz de los nuevos datos un modelo preliminar de génesis de la mena presente en los núcleos de perforación del pozo UBL00809.

2. Generalidades del área de estudio

2.1. Localización geográfica

El pozo UBL0809 fue perforado en el departamento de Cundinamarca, en la Provincia del Guavio, en la vereda San José, jurisdicción del municipio de Ubalá. Se proyecta sobre la plancha 229 Gachalá (escala 1:100.000) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), bajo las coordenadas X:1'060,611, Y:1'114,144, Magna Sirgas con origen Bogotá, como se ilustra en la Figura 1.

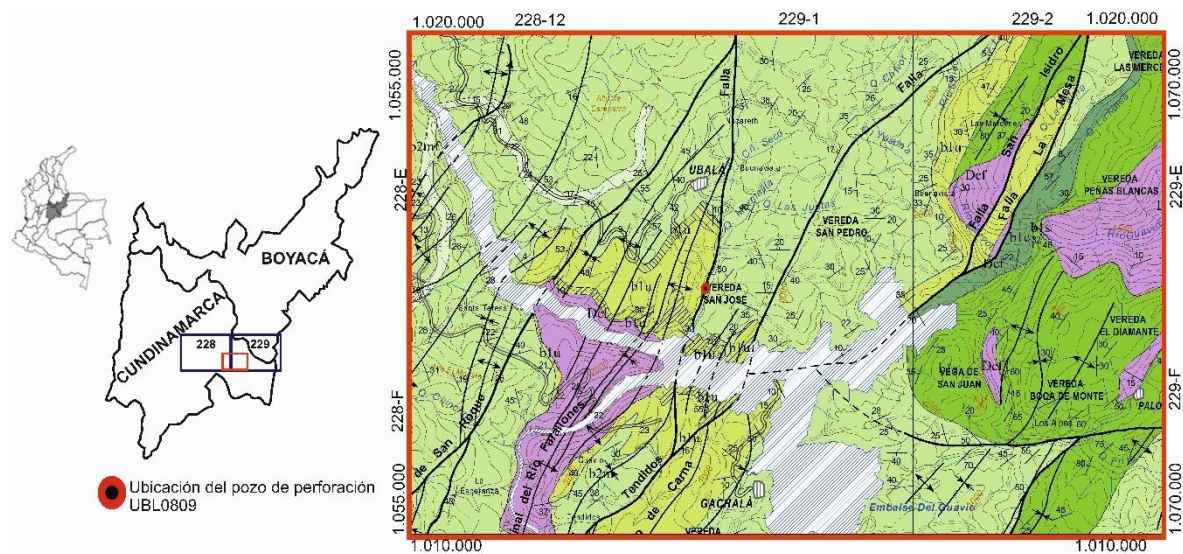


Figura 1. Localización del pozo de perforación UBL0809. Las coordenadas del pozo son proyectadas sobre un fragmento tomado del mapa geológico del CEOR, publicado por Terraza, y otros, (2008).

2.2. Aspectos geográficos y geomorfológicos

El pozo de perforación objeto de estudio fue extraído sobre el piedemonte de la Cordillera Oriental, donde se presenta un sistema de plegamientos sinclinales y anticlinales con dirección SW-NE. Regionalmente estos pliegues se encuentran limitados por las fallas presentes y localmente el pozo se ubica sobre el borde oriental de un pliegue de tipo anticlinal (sin nombre) que hacia el sur expone el basamento Paleozoico (Grupo Farallones) y se encuentra limitado por la Falla el Gusano.

El área es una región montañosa de relieve moderado a fuerte, su hidrografía clasificada como drenajes dendríticos está conformada por los ríos Guavío, Chivor, Trompetas, Rucio, Negro y microcuencas de corrientes menores como la Quebrada Grande.

El municipio de Ubalá tiene una extensión de 50.481 Hectáreas, de las cuales 129 pertenecen al área urbana y 50.378 al área rural. La Temperatura oscila entre los 10 y 20 grados centígrados, con temperatura promedio de 18°C (Alcaldía de Ubalá, 2004).

3. Marco geológico

3.1. Marco geológico regional

El pozo de perforación UBL0809, fue extraído al oriente de la Cordillera Oriental en el área delimitada como Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR), sobre rocas de la Formación Ubalá de edad Cretácica.

En el CEOR se han cartografiado rocas arenolodas de edad Paleozoica del grupo Farallones en contacto discordante con la secuencia Cretácica del Berriasiano conformada por las formaciones Batá, Ubalá, Santa Rosa y Chivor, seguidas por las unidades Lutitas de Macanal, Las Juntas y Fomequé del Valanginiano-Albiano, cubiertas finalmente por depósitos cuaternarios de origen coluvial y aluvial (ver Figura 2).

Ma	Era	Periodo	Edad	Cinturón Esmeraldífero Oriental					
				Sector W	Sector Central	Sector E			
108	Mesozoico	Cretácico	Albiano	Fm. Fômeque					
113			Aptiano						
117			Barremiano						
123			Hauteriviano	Fm. Las Juntas	Fm. Las Juntas	Fm. Las Juntas			
131			Valanginiano	Gp. Cáqueza	Fm. Lutitas de Macanal	Gp. Cáqueza	Fm. Lutitas de Macanal	Gp. Cáqueza	Fm. Lutitas de Macanal
			Berriasiano		Fm. Ubalá		Fm. Chivor		Fm. Batá
135				Fm. Sta. Rosa					
355	Paleozoico	Carbonífero	Gp. Farallones						
410		Devónico							

Figura 2. Estratigrafía del Cretácico inferior para el área del CEOR. El pozo de perforación fue extraído de la Fm. Ubalá (señalada en verde) de edad Berriasiano. Figura tomada de Silva, Mantilla, & Terraza (2010).

Para la descripción de la geología regional se adoptó el informe “Geología de la Plancha 229 Gachalá”, publicado por Terraza, y otros, (2013), enfatizando en el área de la que se extrajo el pozo de perforación UBL0809, como se cita a continuación:

El Grupo Farallones constituye una potente sucesión sedimentaria, predominantemente siliciclástica, con arenitas, limolitas y lodolitas muy compactas, de coloración gris, roja o verde; en el río Chivor, muestra niveles calcáreos importantes representados por wackestone y packstone de crinoideos y braquiópodos.

La formación Santa Rosa y Chivor (la primera reposa sobre la segunda), Ubalá y Batá representan una sucesión de unidades heterópicas del cretácico basal (Berriasiano).

La Formación Batá es una unidad constituida por conglomerados, arenitas, limolitas y lodolitas que tienen reportes de amonitas, palinomorfos y trigonias. El contacto con el infrayacente Grupo Farallones es paraconforme y se ubica en la base del primer nivel conglomerático con cantos de rocas sedimentarias de la parte más baja de la Formación Batá.

La Formación Santa Rosa representa una sucesión de rocas siliciclásticas donde aparecen conglomerados y/o arenitas en la base y le siguen limolitas que muestran cambios en la litología hacia el oriente, donde la unidad adquiere un carácter más lodolítico. Su contacto inferior es discordantemente de baja angularidad sobre el Grupo Farallones y concordante y neto con la suprayacente Formación Chivor. Contiene bivalvos ornamentados y amonitas encontradas en la parte más arcillosa de la unidad.

En la Formación Chivor se reconocen dos intervalos, uno inferior mayoritariamente calcáreo compuesto por calizas (wackestone y mudstone–micritas y biomicritas) que se intercalan con arcillolitas calcáreas y no calcáreas, y el intervalo superior donde se intercalan capas de boundstone con capas de wackestone, mudstone, rocas evaporíticas nodulares y arcillolitas. Descansa sobre la

Formación Santa Rosa e infrayacen a la Formación Lutitas de Macanal ambas contactos concordantes y netos. Se caracteriza por rocas con diferentes texturas evaporíticas acumuladas en ambientes marinos muy someros con bajos niveles de energía sobre el fondo temprano.

En la formación Ubalá se diferencian varios niveles de arenitas y calizas que se intercalan con paquetes de arcillolitas, de norte a sur se presentan diferencias en espesor y cambios laterales de facies. Descansa discordantemente sobre rocas paleozoicas del Grupo Farallones y es suprayacida por capas arcillolíticas de la Formación Macanal en cuyo contacto se han encontrado amonitas que indican el límite Berriasiano-Valangniano temprano.

La formación Lutitas del Macanal es una unidad predominantemente arcillosa con intercalaciones significativas de arenitas y limolitas. Suprayace concordantemente a las formaciones berriasianas Santa Rosa, Ubalá, Chivor o Bata. La fauna de amonitas al norte del municipio Ubalá indican edad Valanginiano temprano, los intervalos arenosos turbidíticos de la parte media-baja fueron datados como Valanginiano tardío y las rocas de la porción superior de la unidad, en la vereda Chivor Chiquito del municipio de Chivor indican edades correspondientes al Hauteriviano.

La Formación Las Juntas se reconoce como una sucesión areno-arcillosa que aflora en los alrededores del caserío de Las Juntas, también aparece al occidente del municipio de Gama y al oriente de Santa María de Bata. Su edad deducida de la posición estratigráfica es Hauteriviano considerando que la base de la suprayacente Formación Fómeque es Barremiano y las capas más altas estratigráficamente de las Lutitas de Macanal son en parte Hauteriviano.

La Formación Fómeque está compuesta por paquetes de arcillolitas con intercalaciones frecuentes de biomicritas y de algunas arenitas y bioesparitas que resaltan en la morfología. La fauna de amonitas encontradas en la base de la formación, aproximadamente a unos 120 m del

techo de la Formación Las Juntas, indican edad Barremiano temprano y las amonitas en la base de la Formación Une sugieren el Albiano medio, de tal manera que la Formación Fómeque abarcaría el lapso Barremiano–Albiano temprano.

La Formación Une sobre el área de estudio solamente aflora la base. Morfológicamente genera un escarpe constituido por bancos gruesos, medianos delgados de cuarzoarenitas de color gris oscuro, meteorizada a tonos gris claro o amarillentos, con textura muy fina y fina, moderadamente a bien calibradas, maduras, con cemento silíceo y con bioperturbación baja; la forma de las capas es lenticular y algunas de ellas muestran estratificación interna inclinada en artesa (sugiriendo migración lateral de canales); se intercalan con las arenitas capas gruesas y delgadas de arcillolita gris oscuro o negro, algo limosa, laminada internamente o maciza. El límite inferior con la Formación Fómeque es concordante–neto; el límite superior no aparece en la zona de estudio. Las amonitas encontradas en la base de la formación sugieren edad Albiano medio.

3.2. Marco geológico local

El pozo de perforación UBL0809 fue extraído de la Formación Ubalá, ubicado en la plancha 229 Gachalá del IGAC, aunque esta unidad también ha sido nombrada por varios autores como Calizas del Guavio, Terraza, y otros, (2013) propusieron el nombre de Fm. Ubalá, utilizado en este informe. A continuación, se citan algunas de las descripciones publicadas sobre esta unidad.

En la Vereda Santuario (plancha 229 del IGAC, cuadrángulo D2) se reconocen dos paquetes de arenitas y calizas sideríticas intercaladas con arcillolitas grises que toman coloración rojiza. Con base en perforaciones realizadas en este sector describen los 76 m superiores de la unidad, en donde encuentran un nivel inferior de 12 m de calizas grises que alternan con margas, luego un

intervalo de 10 a 15 m de rocas con mineralizaciones de hierro (sideritas con hematita, limonita y goethita con texturas masivas y botroidales), y finalmente 35 a 45 m de arenitas de grano medio en la base, con cemento de minerales de hierro, seguidas por calizas arenosas (Cruz & Camacho, 1971).

Según Garzón (1975), en el sector de la Cueva Oscura (Plancha 229 del IGAC, cuadrángulo F1) describe de base a techo 20, 4 m de conglomerados, le siguen 40,2 m de arenitas y calizas arenosas y la parte superior son intervalos de 6, 12 y 1 m de calizas, arcillolitas y arenitas.

Sobre la vía antigua Gachalá-Ubalá (ahora inundada), se levantaron 90 m de capas muy gruesas de cuarzoarenitas y arenitas líticas, de grano fino a medio que se intercalan con lodolitas calcáreas grises que muestran niveles fosilíferos de bivalvos, probablemente debajo de la sección descrita por Garzón (Villamil, 1988).

Más recientemente, Terraza, y otros (2013), observaron dos paquetes de Arenitas y Calizas intercalados con intervalos arcillolíticos, que muestran cambios laterales de facies hacia el occidente (plancha 229 del IGAC, cuadrángulo F1) y hacia el sector de la vereda San Isidro (plancha 228 del IGAC, cuadrángulos E12, F12), en donde toda esta sucesión pasa lateralmente por una capa de arenita que se acuña sobre el Paleozoico. Adicionalmente, proponen el nombre de Formación Ubalá y como sección tipo la columna levantada en la vereda Las Mercedes, con las coordenadas iniciales N: 1.017.002, E: 1.065.900 y las finales N: 1.016.800, E: 1.065.250 (ver la Figura 3), descrita de la siguiente forma:

Segmento A. Espesor 10 m. En la base un conglomerado lenticular (con 6 metros en la parte más gruesa) de cantos de caliza con matriz de lodo calcáreo, le siguen capas gruesas de wackestone intercaladas con capas delgadas de conglomerado granosoportado con partículas que disminuyen de tamaño desde guijos hasta gránulos.

Segmento B. Espesor 105 m. Sólo afloran los 25 metros inferiores, el resto del segmento está cubierto. En los primeros metros se intercalan capas gruesas de wackestones (biomicritas ralas con bivalvos) con capas gruesas y delgadas de arcillolitas calcáreas grises (N4) que meteorizan a tonos café moderado (5YR 3/4 y 5YR 4/4). Le siguen intercalaciones de arcillolitas en capas gruesas y capas delgadas o láminas de boundstone, donde se distinguen estructuras laminares paralelas (¿bindstone?), estructuras estromatolíticas (framestones?) y estructuras nodulares al parecer de origen evaporítico.

Segmento C. Espesor 115 m. Constituido por capas gruesas de arenitas y calizas con contactos ondulados que resaltan topográficamente, separadas por intervalos de arcillolitas que generan valles, en su mayoría cubiertas por depósitos recientes. Las arenitas son cuarzosas, maduras y con tamaño de grano fino y medio. Las calizas corresponden a packstones de pellets (pelesparitas), packstones de bioclastos (biopesparita y bioesparita) y wackestone de bioclastos (biomicritas).

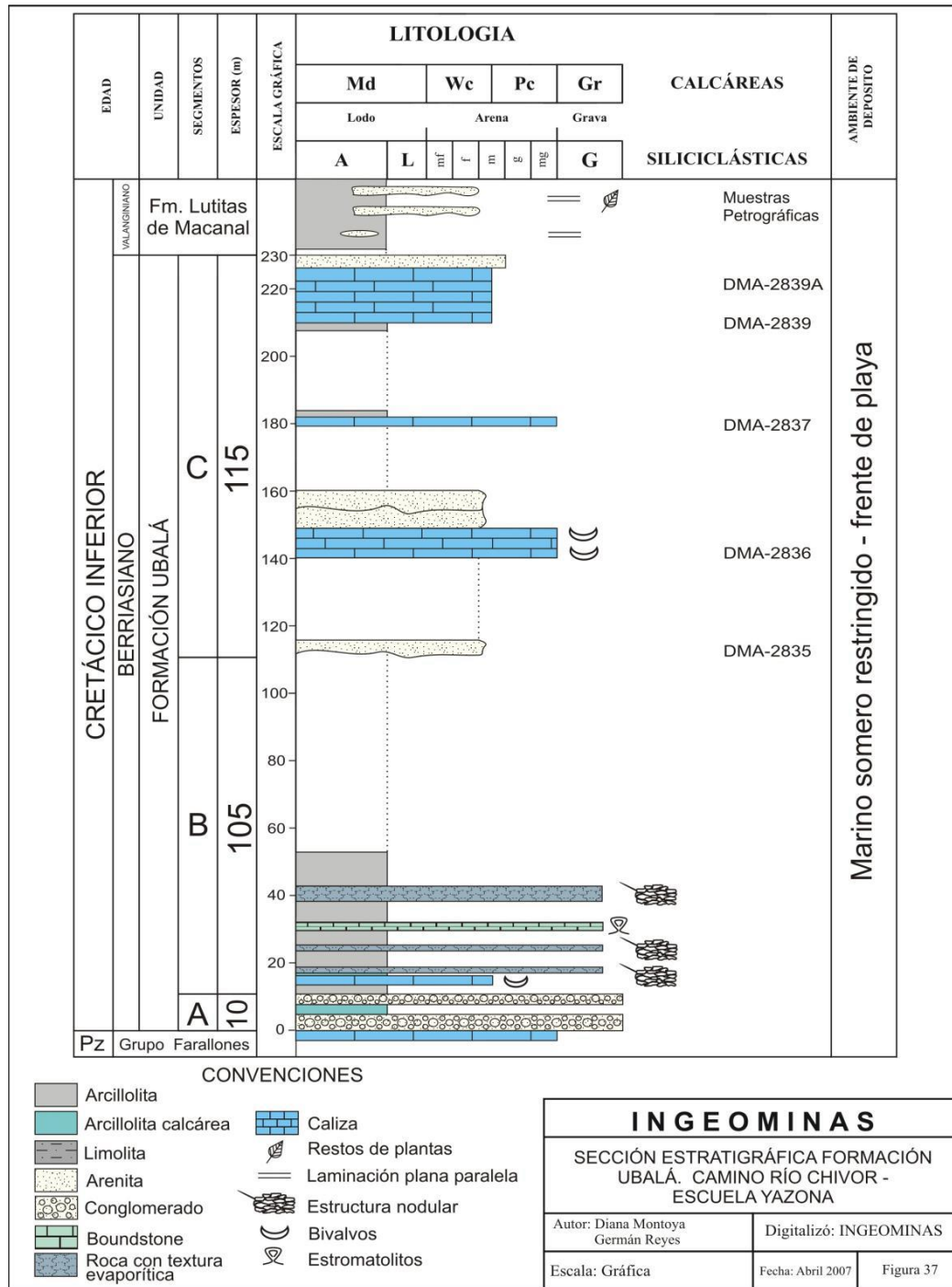


Figura 3. Sección tipo de la Fm. Ubalá, levantada cerca al Río Chivor (Vereda Las Mercedes).

Tomada de Terraza, y otros (2013).

4. Marco Tectónico y Estructural

El pozo de perforación UBL0809 se encuentra sobre la Cordillera Oriental, cuya formación está relacionada con la interacción de las placas tectónicas Nazca y Suramericana. Sobre esta cordillera se encuentra el Macizo de Quetame que atraviesa la zona del CEOR en dirección noreste, y en él afloran rocas del Grupo Farallones que conforman el basamento paleozoico sobre el cual se acumularon las rocas del Cretácico (Alzate, Calderón, Caicedo, & Pinzón, 2013).

Las rocas cretácicas que circundan al macizo y sus características estructurales dependen de su ubicación con respecto a este basamento paleozoico. Al oriente, las fallas que afectan las rocas son estructuras regionales, orientadas suroeste-noreste, que se extienden por decenas de kilómetros y corresponden a fallas inversas con vergencia oriental que hacen parte del sistema de fallas del piedemonte llanero (Terraza, y otros, 2008).

El plegamiento en las rocas del Cretácico, constituye pliegues anticlinales y sinclinales amplios y extensos como el Anticlinal de Garagoa, Anticlinal Peña El Fígaro, Sinclinal de Santa Rosa o Sinclinal de Claraval, entre otros, los cuales presentan orientación noreste-suroeste, así como numerosos pliegues de menor longitud y amplitud (Terraza, y otros, 2008).

4.1. Fallas

Falla del Gusano. Sobre el trazo de esta falla en la plancha 229-III-A fue extraído el pozo de perforación UBL0809 objeto de estudio. Dicha falla controla el cauce de la quebrada el Gusano en el extremo occidental, su vergencia hacia el oriente pone en contacto la Formación Santa Rosa

sobre la Formación Lutitas de Macanal, en el embalse el Guavio, esta falla atraviesa afloramientos de calizas, altamente plegadas y fracturadas (Alzate, Calderón, Caicedo, & Pinzón, 2013).

Falla de Manizales. Es una falla de cabalgamiento con vergencia oriental, su segmento sur tiene dirección N25°E y repite parte de la Formación Ubalá; el segmento central se orienta N20°-40°E y repite la Formación Lutitas de Macanal, éste continua hacia el norte, donde finaliza contra la Falla de San Isidro que produce repetición de la Formación Santa Rosa (Terraza, y otros, 2008).

Falla de la Mesa. Ubicada al norte de la plancha 229-III-A, es una falla inversa, con dirección NE-SW y con vergencia al oriente, donde se repite la secuencia de la Formación Santa Rosa sobre rocas de la Formación Lutitas de Macanal en el sector de la vereda Las Mercedes, su extensión hacia el sur pasa por el Alto del Águila donde repite el segmento calcáreo generando como respuesta topográfica la cima del Cerro, más adelante su trazo no es claro, debido posiblemente a que cambia su dirección en el sector donde actualmente se encuentra el embalse del Guavio (Alzate, Calderón, Caicedo, & Pinzón, 2013).

Falla de San Roque. Es una falla transcurrete (sinestral con salto vertical) que pasa al occidente de la inspección de policía de San Roque; presenta poco desplazamiento vertical y lateral, sin embargo, produce el truncamiento de varios pliegues (anticlinales y sinclinales) al oriente de la inspección de policía de Claraval (Plancha 228 del IGAC: Cuadrángulos G10-G11) (Terraza, y otros, 2008).

4.2. Pliegues

El plegamiento asociado a las fallas se presenta un sistema de sinclinales y anticlinales con dirección SW-NE, regionalmente estos pliegues se encuentran limitados por las franjas de fallas presentes, y la mayoría de ellos involucran las formaciones del cretácico temprano (Alzate, Calderón, Caicedo, & Pinzón, 2013).

En el sector de la Cueva Oscura se observa una serie de plegamientos sinclinales y anticlinales. Allí, la Formación Santa Rosa se encuentra discordante sobre rocas Paleozoicas y es afectada por dos fallas (sin nombre) entre las cuales se genera replegamiento; otro pliegue presente en la zona de estudio es el Sinclinal de Palomas, el cual se forma en el miembro calcáreo de la Secuencia Santa Rosa. En el sector de la Quebrada Golpe de Agua de la vereda la Vega de San Juan se observa un anticlinal que expone el basamento Paleozoico (Grupo Farallones) y se encuentra afectado por una falla inversa (Alzate, Calderón, Caicedo, & Pinzón, 2013).

5. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se agruparon las distintas actividades en tres fases, planeación, ejecución y resultados, de modo que se obtuvieron los resultados enmarcados en los objetivos planteados.

5.1. Fase de planeación

Esta fase inicia con la proyección de las coordenadas geográficas de los 35 pozos de perforación, almacenados en la Litoteca Nacional, sobre los mapas de cartografía geológica a escala 1:100000 y 1:25000 del IGAC, lo cual permitió conocer la estratigrafía del área descrita en la memoria de la geología de la plancha 229 de (Terraza, y otros, 2013). Posteriormente, se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos SinceDirect, Scopus, Springer, Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG), Boletín de Geología y proyectos de grado de la Universidad Industrial de Santander, para obtener información sobre la geología local, regional, el contexto de formación paleogeográfico y paleotectónico de las unidades geológicas presentes.

La siguiente actividad consistió en seleccionar los pozos de perforación adecuados para el estudio, entre treinta y cinco posibles (UBL0801 hasta UBL0835). El criterio de selección se basó en el contenido de sulfuros determinado por una inspección visual, con la que se escogieron los pozos de perforación UBL0807, UBL0808 y UBL0809 como candidatos para el estudio, sin embargo, se decidió trabajar solo el UBL0809 porque los otros dos se encontraban sobre el mismo punto de coordenadas y la disponibilidad de tiempo de observación del pozo en las salas de la Litoteca Nacional era limitada.

Finalmente, se establecieron los criterios para describir macroscópicamente los núcleos del pozo de perforación UBL0809 y fueron plasmados en un formato diseñado con el propósito de realizar una descripción sistemática de las características observables en los núcleos, para identificar las variedades litológicas presentes y la tipología de las alteraciones hidrotermales que les han afectado (ver Figura 4).

ROCA CALCÁREA		Observaciones	VETILLAS			Intensidad de la alteración hidrotermal	Descripción de la alteración hidrotermal	Familia de vetillas (con características similares)	Fotografía
Intervalo descrito (ft)	% de aloquímicos		Terminología de Folk, 1959	Espesor (mm)	Forma (sinuosidad, continuidad y paralelismo)				

Figura 4. Formato utilizado para la descripción de los núcleos del pozo de perforación UBL0809.

Para estimar el porcentaje de aloquímicos se utilizaron las tablas de Baccelle y Bosellini (1965) y la terminología utilizada para la clasificación de las rocas carbonatadas fue la propuesta por Dunham (1962).

Para este trabajo se propuso la escala de intensidad de vetilleo, la cual, es de medida relativa y se basa en la observación de la cantidad de vetillas presentes en un intervalo de 30cm de núcleo. Esta escala se presenta de la siguiente forma: Ausente (V0): no se observan vetillas, débil (V1): se observan pocas vetillas, moderado (V2): la cantidad de vetillas en proporción con la roca caja es menor de 1:3, fuerte (V3): la cantidad de vetillas en proporción con la roca caja es menor de 1:1, muy fuerte (V4): la cantidad de vetillas ocupa igual o mayor espacio que la roca caja.

Asimismo, se propuso una escala de intensidad para la alteración hidrotermal, de medida relativa, la cual se basa en la observación de los halos de alteración en la roca encajante que fueron causados por la interacción con el fluido hidrotermal formador de la mineralización. Esta escala se presenta de la siguiente forma: No observable (A0): no se observa alteración, ligera (A1): se

observa débilmente la alteración, marcada (A3): Se observa claramente la alteración, pero su extensión está limitada en áreas cercanas a las vetillas, marcada y extendida (A4): Se observa claramente la alteración y se extiende ampliamente desde las vetillas hacia gran parte de la roca.

Análogamente, se diseñó un formato para levantar una columna estratigráfica (ver Figura 5) que representara gráficamente la información obtenida durante la descripción de los núcleos de perforación la cual resalta las particularidades mineralógicas y texturales presentes en los niveles de profundidad descritos.


Pozo: Intervalo (ft):		Latitud: Longitud:	Escala: 0  2ft		
Litología	Aloquímicos	Vetillas	% Sulfuros (diseminados o en vetillas)	Fotografía	

Figura 5. Formato utilizado para levantar la columna estratigráfica del pozo de perforación UBL0809.

5.2. Fase de ejecución

Durante esta fase se realizó una descripción petrográfica por medio de cuatro métodos: observaciones a escala macroscópica, observaciones en el microscopio de luz transmitida, microscopía electrónica de barrido – espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS) y difracción de rayos X (DRX).

Descripción macroscópica. La descripción macroscópica de 91,7 m del pozo de perforación UBL0809 se realizó en un espacio adecuado en la Litoteca Nacional, con la disponibilidad de una lupa estereoscópica NIKON SMZ-1, una cámara digital Canon SX130 IS, lupa de mano (20X), lápiz rayador punta de tungsteno con imán, ácido clorhídrico diluido al 10%, rayador de hierro y rayador de cobre.

Microscopía óptica de luz transmitida. Se prepararon seis laminas doblemente pulidas sin cubreobjetos, a las cuales se les aplicó tinción de rojo de alizarina y tinción de ferrocianuro de potasio. Las láminas fueron tomadas del pozo UBL0809 a las siguientes profundidades: UBL0809-L1 a 3 m, UBL0809-L2 a 3.5 m, UBL0809-L3 a 4.9 m, UBL0809-L4 a 7.8 m, UBL0809-L5 a 14 m y UBL0809-L6 a 41.1 m. (ver Figura 6).

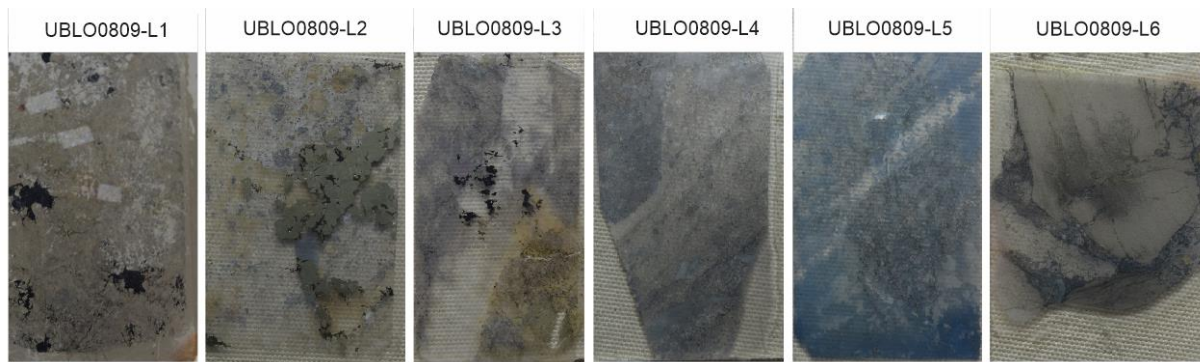


Figura 6. Láminas pulidas sobre las cuales se realizó la microscopía óptica de luz transmitida.

Sobre la lámina pulida UBL0809-L1 se analizaron los puntos de SEM-EDS.

La descripción petrográfica se realizó en un microscopio de luz transmitida Nikon Ys2t con cámara digital Nikon 5200 de propiedad de la empresa Génesis Consultoría en Geología.

Microscopía electrónica de barrido – espectrometría de dispersión de energía (SEM+EDS). Sobre la sección delgada UBLO0809-1 (ver Figura 6) se seleccionaron los puntos de análisis y se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón y recubierta con carbono. EL equipo utilizado fue un Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 y las imágenes obtenidas fueron tomadas con las siguientes características: alto vacío, voltaje de aceleración 15 kV. El detector para imágenes de electrones secundarios (SE) Everhart Thornley detector ETD (para observar morfología) y para electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD (para observar variaciones de composición).

El análisis de química mineral (semicuantitativo) se realizó bajo las siguientes condiciones: un voltaje de aceleración 15 Kv y con detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy).

Finalmente, el Software utilizado fue EDX Genesis para la información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

Difracción de rayos X (DRX). La preparación de las cuatro muestras inició seleccionando los cuatro puntos sobre las tabletas de roca que quedaron como testigos de las láminas pulidas, los cuales se pueden ver en los círculos señalados en la Figura 7, sobre éstos se extrajo aproximadamente cinco gramos de roca para cada una de las muestras, utilizando un taladro con broca de tungsteno.

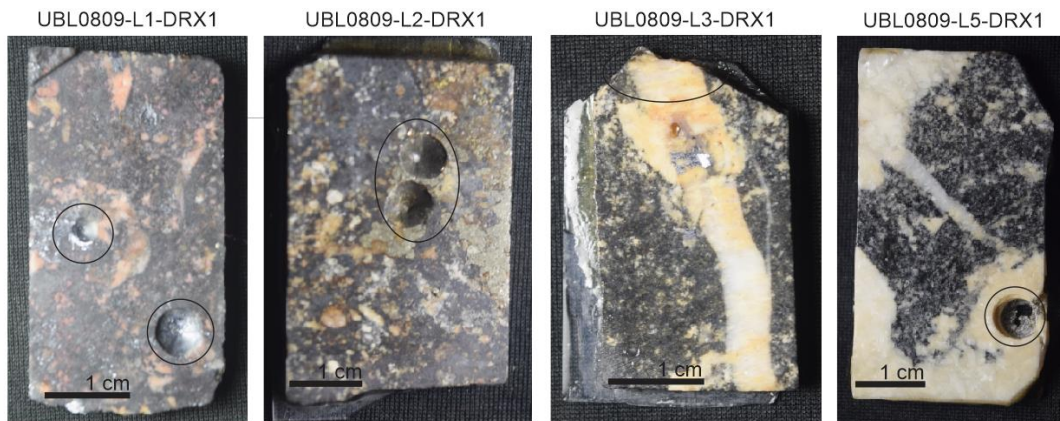


Figura 7. Tabletas de roca que quedaron de la preparación de las láminas pulidas (testigos).

Posteriormente, las muestras fueron molturadas y homogenizadas en un mortero de ágata, seguidamente, los especímenes seleccionados de las muestras fueron mezclados con parafina y finalmente, esparcidos sobre la superficie de los portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA) con centro de silicio “Low Background”.

El registro de datos se realizó en un difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:

Voltaje: 40 KV, corriente: 40 mA, rendija de divergencia: 0,6 m, rendijas soller primario: 2,5 °, rendijas soller secundario: 2,5 °, tamaño de paso: 0,02035 °² Theta, tiempo por paso: 0,6 S,

rango de registro: 2 a 70 °2 Tetha, radiación: Cobre, filtro: Níquel, uso de anti-dispersor de aire: sí, detector: Lineal LynxEye, tipo de barrido: a pasos, observaciones: muestras inorgánicas.

5.3. Fase de resultados

En esta última fase se interpretaron los datos obtenidos en las fases anteriores, se redactaron en el presente informe y se diseñó una presentación de diapositivas.

6. Resultados

6.1. Litologías

En el pozo de perforación UBL0809 predominan dos litologías, un conglomerado clasto soportado y una metasomatita mineralizada en Pb-Fe, las otras litologías que están presentes en el pozo son niveles de poco espesor de lodolita yesífera, arcillolita, caliza y limonita-gossan.

*Metasomatita ankerita-siderita-galena**. La roca precursora a la actividad hidrotermal fue una arenisca calcárea, la cual se encuentra alterada de forma pervasiva, debido a la interacción con un fluido hidrotermal que precipitó ankerita, siderita y galena como minerales principales y en menor cantidad cuarzo, pirita, calcopirita, dolomita y calcita.

En el pozo de perforación objeto de estudio, se describieron 31.4 m de metasomatita color negro con poca a nula porosidad primaria y por lo tanto bastante densa, con tonalidades de color blanco amarillento causadas por los carbonatos y por el cuarzo hidrotermal que la conforman; también se pudo identificar en algunos intervalos del pozo la presencia de fósiles de bivalvos, gasterópodos y braquiópodos recristalizados generalmente a ankerita-siderita y otras veces a ankerita-siderita-galena. Frecuentemente se observan estilolitos horizontales, todos con bordes suaves y algunos rellenos por óxidos de manganeso y que suelen aumentar su frecuencia al estar cerca de núcleos con texturas de procesos de presión – disolución (ver Figura 8).

* Nombre asignado siguiendo las recomendaciones de la Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks (IUGS, 2006)

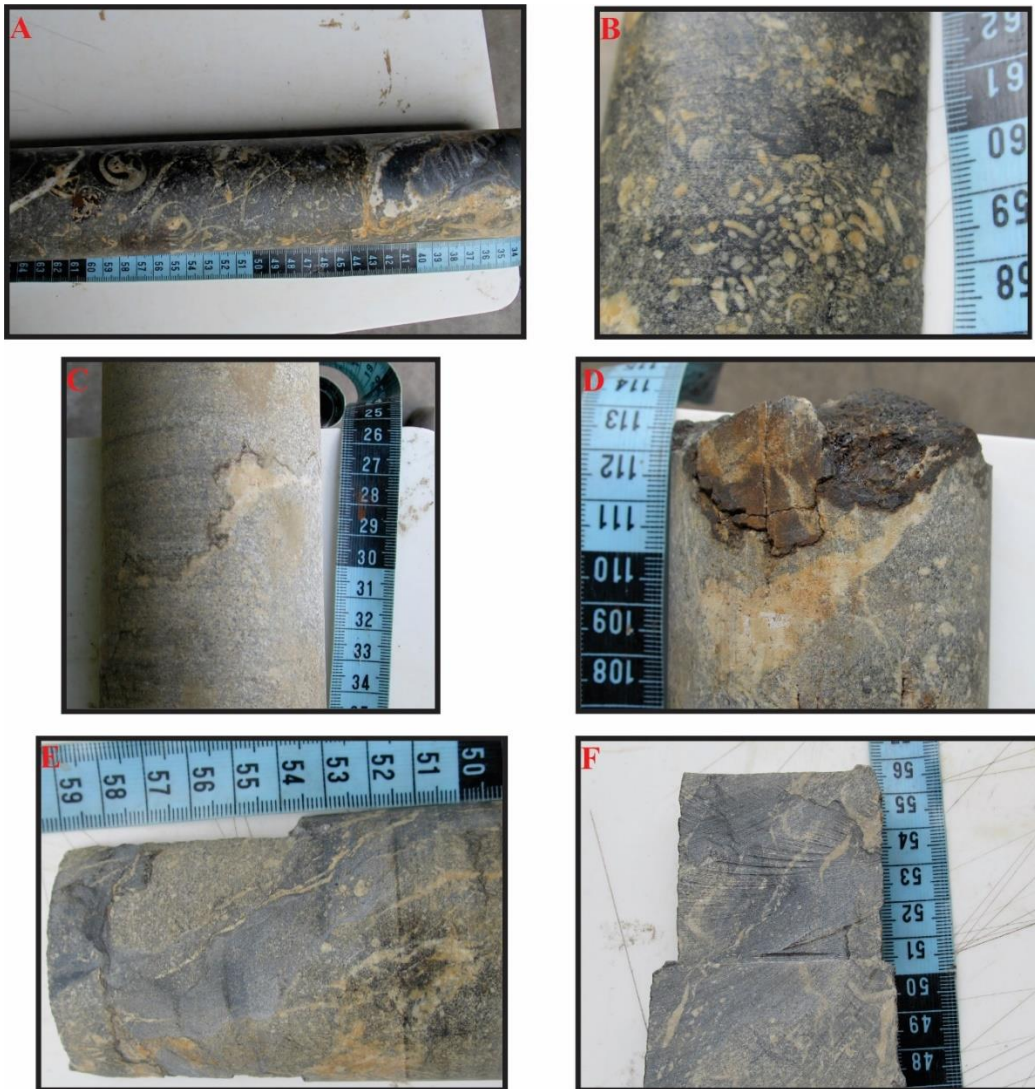


Figura 8. Fotografías de núcleos con metasomatita del pozo UBL0809. A) Gasterópodos recrystalizados a ankerita-siderita. B) Fragmentos de bivalvos recrystalizados a ankerita-siderita. C) y D) Estiolitos horizontales. D) y F) Texturas resultantes de procesos de presión-disolución.

Conglomerado. Esta es la litología de mayor extensión en el pozo de perforación UBL0809, consiste de un conglomerado de textura clasto soportada (ver Figura 9) el cual contiene algunos niveles de textura matriz soportada, ambas texturas con matriz de tamaño de grano lodoso. Adicionalmente, sobre la matriz se observaron pequeños fragmentos de bioclastos cerca al

contacto con la caliza suprayacente y a mayor profundidad es reiterativa la presencia de rellenos de carbonatos de origen hidrotermal en la porosidad secundaria y en la matriz del conglomerado (ver Figura 10).

El tamaño de los clastos varía desde gránulos (2-4 mm) hasta bloques (mayor a 256 mm), con la mayoría de sus bordes desde subredondeados hasta bien redondeados, con muy pocas excepciones donde se presentan clastos de cuarzo anguloso.

La composición es polimíctica, con clastos de lodolita gris-verdosa, clastos de cuarzo con textura moteada de puntos negros y clastos de cuarzo lechoso, como se ilustra en la Figura 11; además, se observó que algunos granos de lodolita gris-verdosa estaban alterando a sílice en sus bordes y sobre otros granos se encontró que en su interior contenían pequeñas cantidades de galena (ver *Figura 12*), pirita y calcopirita, pero esto con muy poca frecuencia.



Figura 9. Fotografías de un núcleo donde se observa el conglomerado con textura clasto soportada. Sobre la esquina inferior izquierda se observan fragmento de bioclastos en la matriz.

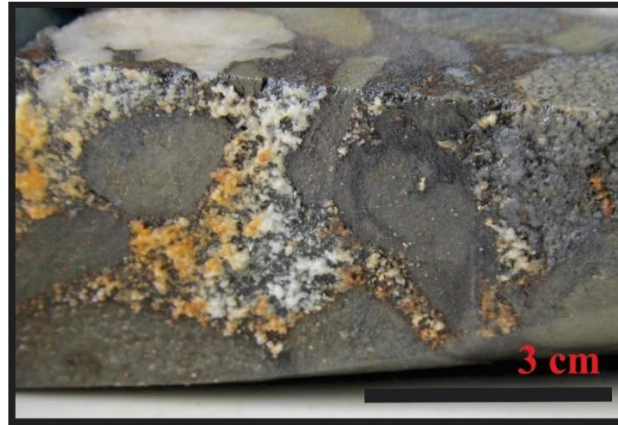


Figura 10. Fotografías de un núcleo que presenta relleno hidrotermal de carbonatos en la matriz del conglomerado.

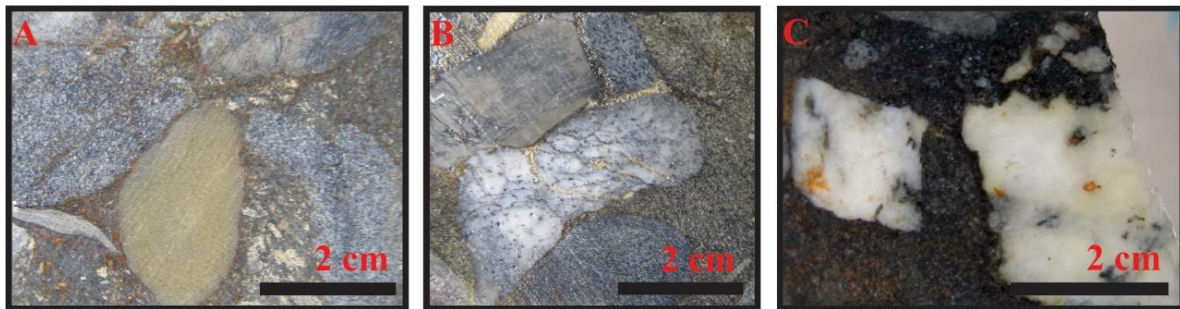


Figura 11. Fotografías sobre núcleos mostrando los clastos que conforman el conglomerado. A) Clasto de lodolita gris verdosa B) Clasto de sílice moteado con finas vetillas de pirita. C) Clastos de cuarzo lechoso.

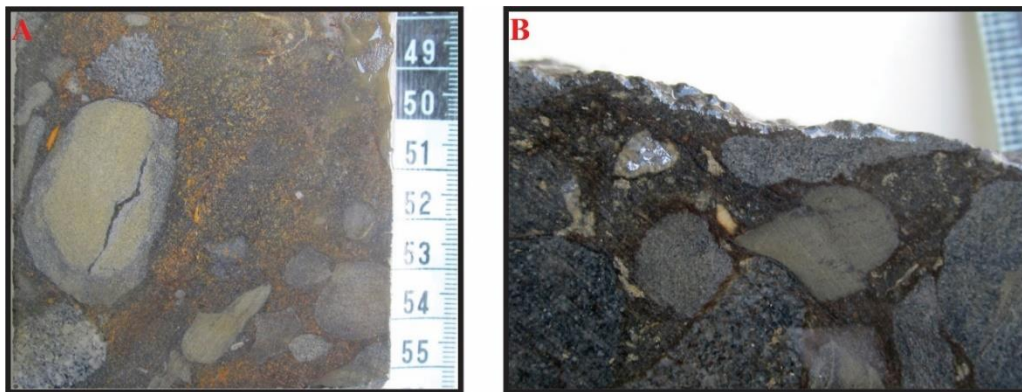


Figura 12. Fotografías tomadas a núcleos sobre el Conglomerado. A) Se observa un clasto de lodolita gris verdosa alterando a sílice en sus bordes B) clasto de carbonato con galena en su interior.

Lodolita yesífera. Se describió una capa de 30,5 cm de yeso acicular sobre una lodolita negra (ver Figura 13) la cual estratigráficamente se observa como un nivel cuyo contacto inferior es neto con el conglomerado y el contacto superior es gradacional con el mismo conglomerado, en el contacto inferior se observa un desplazamiento entre las dos capas como se puede ver en la Figura 13B y además, a unos metros en profundidad después del contacto inferior se registran pequeños lentes de esta litología.

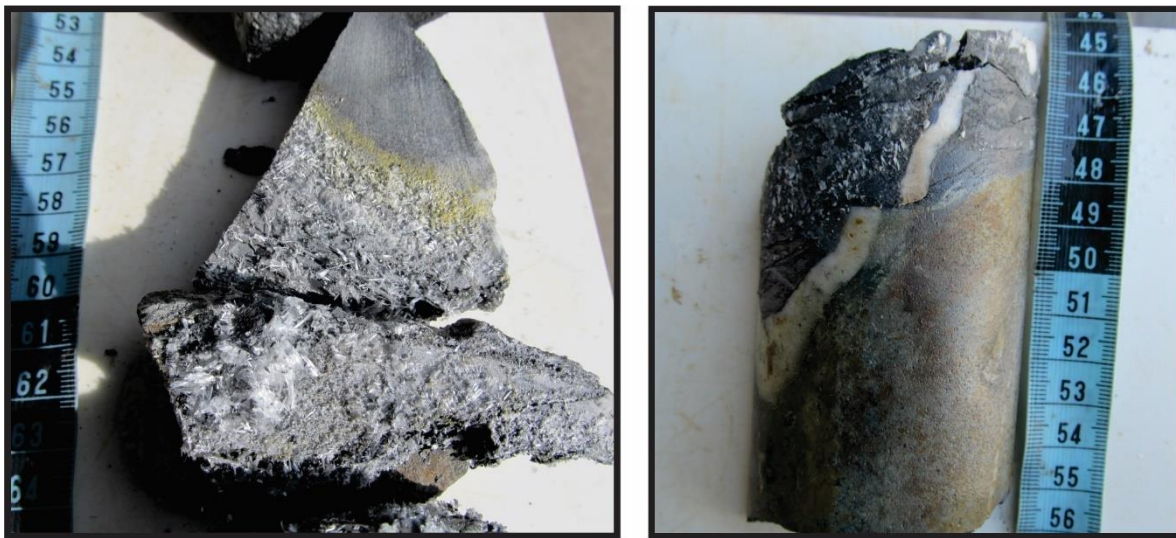


Figura 13. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809. A) Fotografía de lodolita yesífera. B) Contacto inferior de la lodolita yesífera con el conglomerado, mostrando desplazamiento entre las dos capas.

Arcillolita. Se presenta en color negro, bien cementada, con procesos de oxidación que generan algunas tonalidades verdosas, generalmente de contacto es gradacional con el conglomerado que se intercala en las profundidades de 66.1 – 72.5 m, 21 –84.4 m y 85.6 – 87.2 m; también, se presenta como lentes entre la brecha conglomerática a 51.8 m, 56.1 m y 62.2 m de profundidad (ver Figura 14).



Figura 14. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 sobre niveles arcillolíticos. A) Arcillolita negra bien cementada. B) Lente de arcillolita entre el conglomerado. C) Contacto transicional entre la arcillolita y el conglomerado.

Caliza. Caliza con textura wackestone de bioclastos, contiene bivalvos, gasterópodos y otros organismos (ver Figura 15). Los procesos hidrotermales en esta capa no son frecuentes, excepcionalmente se observó una veta de ankerita, siderita, galena y piritita (ver Figura 16).

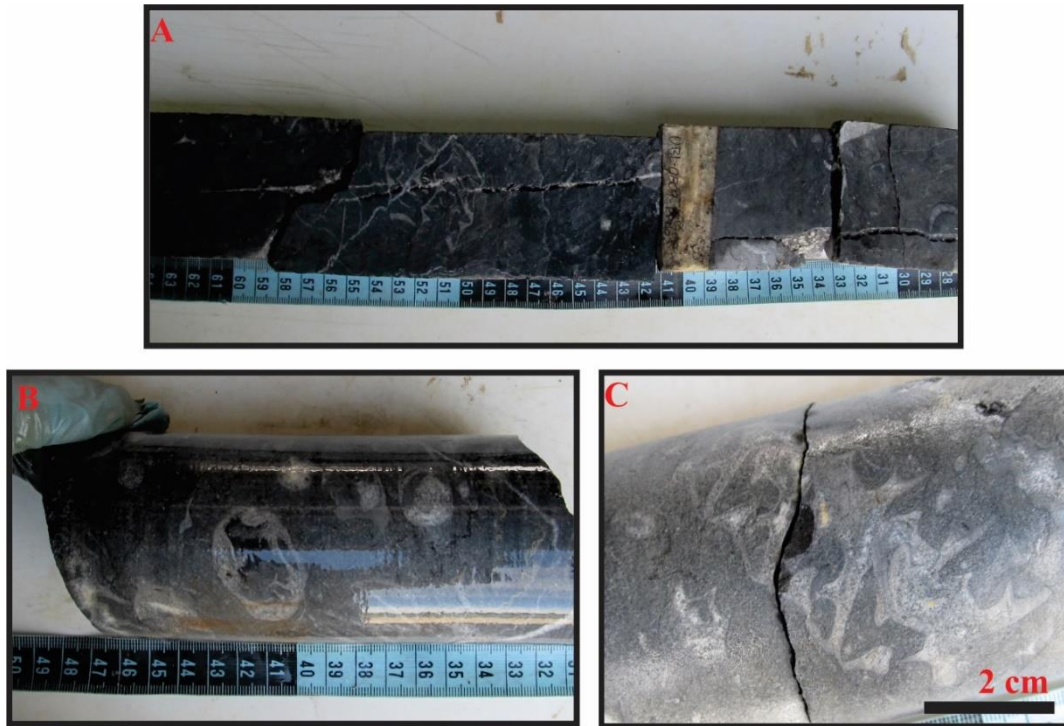


Figura 15. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 mostrando en A, B y C los bioclastos en caliza con textura wackestone.



Figura 16. Fotografía de núcleo del pozo UBL0809 mostrando un relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena-pirita-cuarzo.

Limonnita – Gossan. Son las rocas más superficiales del núcleo de perforación UBL0809, se presentan en un nivel de espesor de 0,7 m conformado por de óxidos hidróxidos producto de alteración supérgena de minerales de hierro y sulfuros, éstos presentan un color anaranjado, textura porosa y abundantes óxidos hidróxidos disgregados, mineralógicamente se identificó anglesita y óxidos hidróxidos de alteración de siderita (ver Figura 17).



Figura 17. Fotografías de la limonita-gossan en núcleos del pozo UBL0809. A) Textura porosa de óxidos con anglesita en color gris B). Colores anaranjados fuertes de óxidos hidróxidos.

6.2. Columna estratigráfica

Se levantó una columna estratigráfica de 91.7 m para el pozo de perforación UBL0809 (ver Figura 18), la cual se dividió en cuatro segmentos diferenciados por los niveles de alteración y sus cambios litológicos, como se referencia en la siguiente descripción de base a techo:

El “segmento D” tiene un espesor de 52 m, principalmente conformado por roca conglomerática que se intercala hacia la base con lodolitas y hacia el tope aparece una capa de 30,5 cm de yeso acicular.

El “segmento C” tiene un espesor de 30 m conformado en su base por 2.7 m de caliza de textura wackestone de bivalvos y 28.3 m de metasomatita con gasterópodos y bivalvos. En este segmento, se presenta una intensa actividad hidrotermal que forma texturas en drusa y en peine de ankerita (mena de Fe) y cuarzo y cantidades traza de galena, pirita y calcopirita.

El “segmento B” corresponde a la parte más somera de la metasomatita la cual presenta la mineralización de la mena de Pb contenida en galena y de Fe en siderita, principalmente diseminada y en bolsadas; éste segmento tiene una extensión de 9 m de longitud vertical en el pozo y está constituido únicamente por metasomatita, que particularmente contiene gasterópodos, bivalvos y braquiópodos recristalizados.

El “segmento A” está conformado por un nivel fuertemente meteorizado de 0,7 m espesor de limonita - gossan.

6.3. Eventos hidrotermales

Sobre los 31,4 m de metasomatita presentes en el pozo de perforación UBL0809 se desarrolló una intensa actividad hidrotermal diferenciada en tres etapas y la primera de éstas es dividida en dos estadios por sus diferentes condiciones de crecimiento a partir de un mismo fluido. En concordancia, la mineralización mena de Pb-Fe se ubicó en la etapa 1 en su estadio A (estadio inicial).

Etapa 1A. Se dividió en los estadios A y B, el estadio A es el más importante para la mineralización mena de Pb-Fe, pues allí precipitan de forma diseminada y en bolsadas galena, siderita, ankerita y en menor cantidad cuarzo, dolomita, calcita, pirita y calcopirita (ver Figura 19). Los anteriores minerales fueron descritos macroscópicamente y sus propiedades representativas se mencionan a continuación:

Ankerita - siderita: Minerales mena de Fe para este depósito, los cuales son complicados de diferenciar el uno de la otro en muestras de mano, se presentan en color blanco amarillento, pero debido a la oxidación de hierro pueden parecer pardo a pardo amarillento, efervescen en caliente (calentando el mineral con una llama por un minuto) al ácido clorhídrico y se encuentran diseminados, remplazando bioclastos y en bolsadas.

Galena: Es la mena de Pb para este depósito, se presenta de color gris plomo, con raya gris oscura, brillo metálico, exfoliación cúbica y dureza menor a 3 en la escala de Mohs, al aplicarle ácido clorhídrico expele olor a huevo podrido. Se encuentra en forma diseminada, en bolsadas, y algunas veces en texturas de remplazamiento.

Cuarzo: Cuarzo lechoso, algunas veces levemente translucido, dureza 7 en la escala de Mohs, diseminado en la roca y en ocasiones difícil de distinguir de los carbonatos que lo acompañan.

Pirita y calcopirita: De color amarillo latón y brillo metálico, se diferencian por la iridiscencia de la calcopirita y se encuentran en bajas cantidades en los núcleos del pozo.

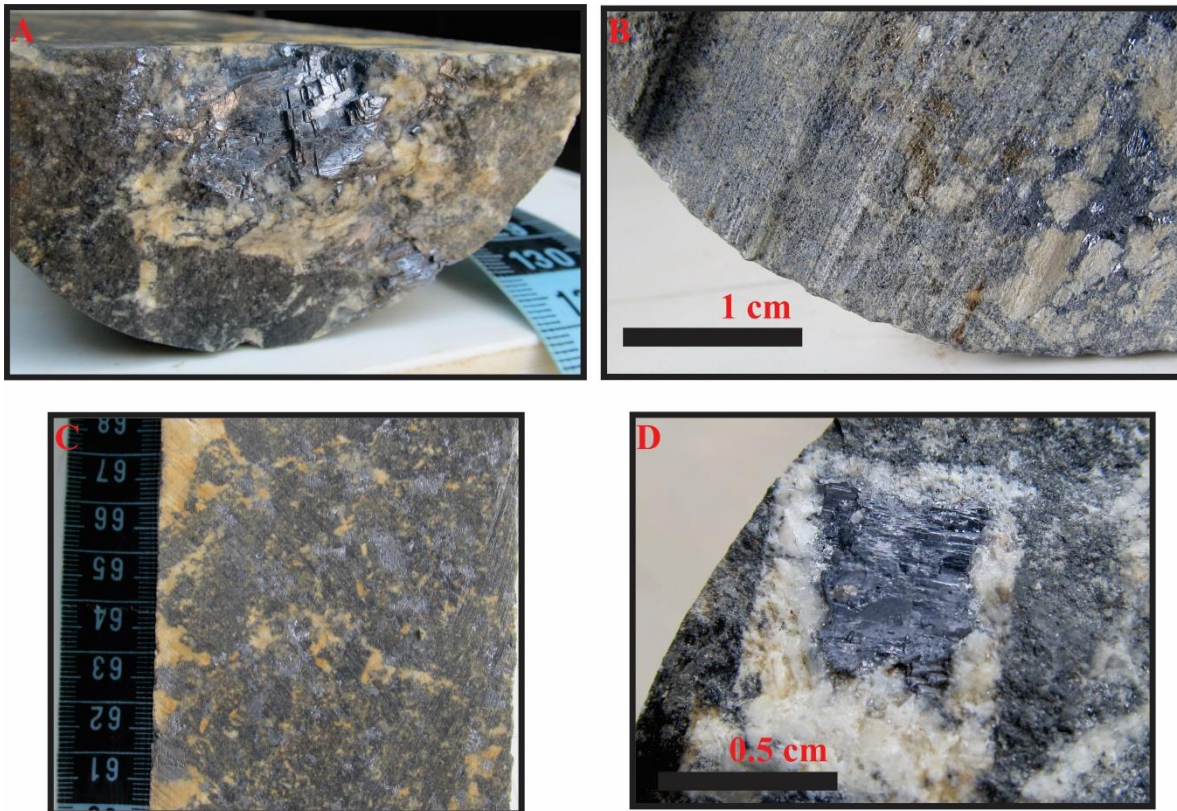


Figura 19. Fotografías de núcleos con mineralización Pb -Fe de la etapa 1A en la metasomatita.

A) Relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena. B) Mineralización diseminada de siderita-ankerita-galena-pirita. C) Mineralización diseminada de ankerita-siderita-galena. D) Textura de reemplazamiento compuesto por siderita-ankerita-galena-cuarzo.

Etapa 1B. La etapa 1 se dividió en los estadios A y B, en el estadio B el fluido hidrotermal precipita ankerita y cuarzo sobre cavidades que proporcionan el espacio para formar minerales con perfecto habito euhedral y en agregados de drusa y de peineta propias de un enfriamiento lento

desde las paredes de la cavidad hacia el centro, esta mineralización se presenta principalmente en bolsadas conformadas por ankerita y cuarzo (ver Figura 20).

Ankerita: Los cristales son de color blanco lechoso y es frecuente el crecimiento maclado, con hábitos romboédricos y agregados en silla de montar, con textura en drusa y en peineta.

Cuarzo: Se presenta en cristales translucidos de hábito hexagonal piramidal y en agregados masivos, los cristales presentan brillo vitreo y en agregados se presenta en color blanco lechoso.



Figura 20. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 con mineralización de la etapa 1B. A) Bolsadas de ankerita-cuarzo B) Textura en drusa de ankerita-cuarzo. C) Cristal piramidal de cuarzo sobre ankerita romboédrica. D) Agregado de ankerita en silla de montar. E) Cristal de ankerita.

Etapa 2. Un segundo fluido hidrotermal rico en sílice, formó cuarzo, ankerita, siderita y en menor proporción galena, formando vetillas de bordes rectos y hasta un centímetro de ancho, las cuales se observan cortando la metasomatita, como se puede observar en la Figura 21. Las propiedades macroscópicas identificadas en los minerales mencionados, son las siguientes:

Ankerita-siderita: Se observan como manchas de color blanco amarillento sobre la vetilla, su identificación en muestra de mano se logra porque efervesce en caliente al ácido clorhídrico.

Cuarzo: Es el principal componente de la vetilla, el cual se presenta de color blanco lechoso y con dureza siete en la escala de Mohs.

Galena: se presenta de color gris plomo, raya gris oscura, brillo metálico y dureza menor a tres en la escala de Mohs.

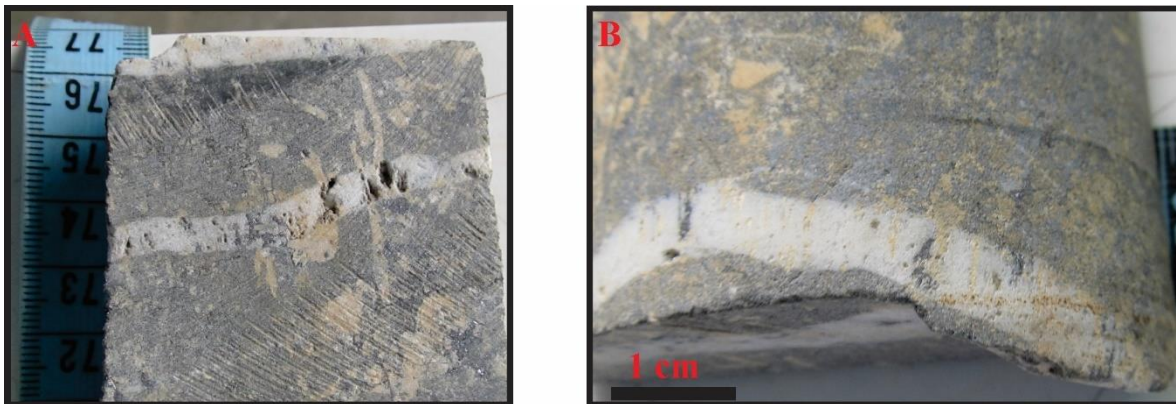


Figura 21. Fotografías de núcleo del pozo UBL0809. En las figuras A y B se observan vetillas de cuarzo-ankerita-siderita-galena de la etapa 2.

Entre las profundidades de 45.4 y 44.8 m del pozo objeto de estudio, se observó un relleno hidrotermal de la etapa 1A cortado por la vetilla de la etapa 2. Mineralógicamente se distingue ankerita-siderita-galena-pirita en un relleno hidrotermal en forma de veta sinuosa, atravesado por una vetilla de ankerita-siderita-cuarzo (ver *Figura 22*).

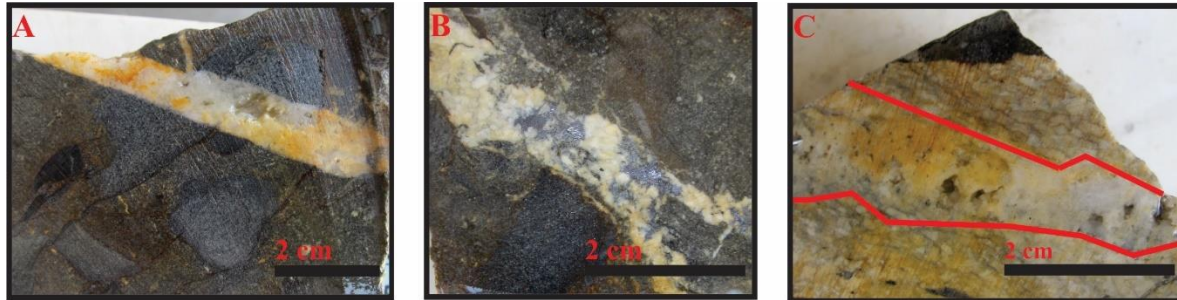


Figura 22. Fotografías de núcleos del pozo UBL0809 mostrando actividad hidrotermal sobre el conglomerado. A) Vetilla de ankerita-siderita-cuarzo. B) Relleno hidrotermal de ankerita-siderita-galena. C) vetillas de ankerita-siderita-cuarzo atravesando una veta de ankerita-siderita.

Etapa 3. Esta es la última etapa de alteración, ocurrida por fluidos enriquecidos en materia orgánica que forman un nivel de limonita-gossan sobre la parte más superficial del pozo de perforación UBL0809 (ver *Figura 23*) y más profundamente se genera oxidación de sulfuros y de minerales de hierro. Los minerales de alteración supérgena formados en esta etapa son:

Anglesita (ang): Es un mineral producto de alteración de la galena, se presenta en color gris claro y brillo no metálico.

Malaquita (Mq): Es un mineral producto de alteración de sulfuros de cobre que se identifica por su color verde claro, brillo no metálico, en agregado terroso y dureza 3 en a escala de Mohs.

Goethita: Es un mineral producto de alteración de la pirita.

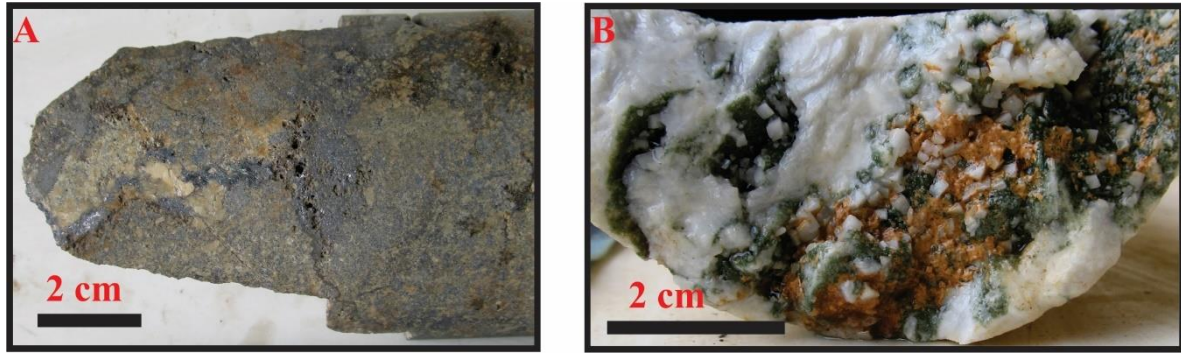


Figura 23. Fotografías de núcleos con minerales producto de alteración supérgena: A) Anglesita. B) Malaquita.

6.4. Asociaciones minerales

La metasomatita anteriormente descrita presenta una variedad de minerales de origen hidrotermal formados en las etapas 1A, 1B, 2 y 3, por ello, se describieron seis laminas delgadas doblemente pulidas, sin cubreobjetos y con tinción de rojo de alizarina y tinción de ferrocianuro de potasio, con el objetivo de caracterizar la mineralogía precipitada en cada una de estas etapas.

Roca precursora a la mineralización. La roca precursora que hospedó los rellenos hidrotermales es una arenisca calcárea que por su fuerte alteración metasomática, disolvió su cemento original y ahora entre sus granos sólo se observan carbonatos epigenéticos.

Adicionalmente, como se puede observar a la izquierda de la línea roja en la Figura 24, los bordes de grano del cuarzo de la arenisca calcárea están obliterados, esto es causado por un proceso conocido como sombras de crecimiento del cuarzo o línea de polvo del cuarzo, donde se desarrolló un crecimiento epigenético sobre los bordes de éstos a partir de un fluido que precipitó sílice.

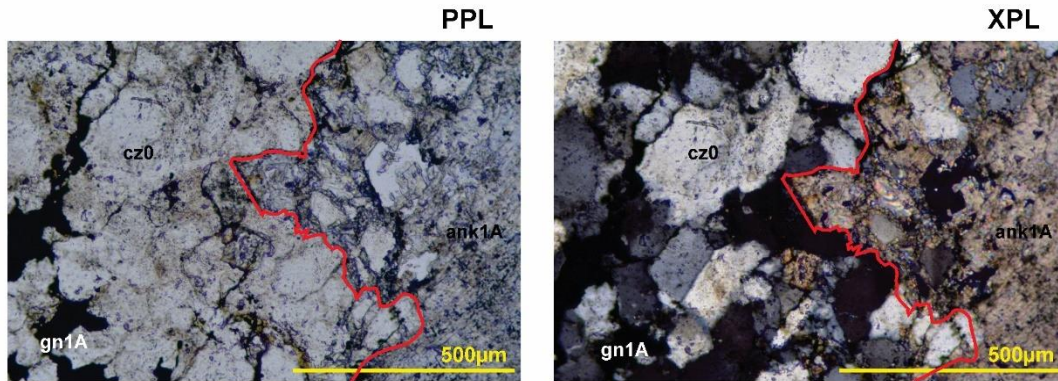


Figura 24. Fotografía de la lámina UBL0809-L1 mostrando sombras de crecimiento sobre cuarzo detrítico.

Asociación 1A. Esta asociación corresponde a los minerales formados durante la etapa 1A, la cual afectó las rocas cretácicas del pozo UBL0809 y principalmente la metasomatita, durante esta etapa se formó ankerita, siderita, galena y en menor cantidad cuarzo, dolomita, calcita, piritita y calcopiritita. Éstos minerales presentan las siguientes propiedades ópticas:

Ankerita 1A (ank_{1A}): Se presenta entre los colores turquesa azulado y pardo claro (debido a la tinción), en agregado masivo, sin exfoliación observable, su relieve es medio, con alta birrefringencia y frecuentemente presenta extinción ondulante (ver Figura 25 y Figura 26).

Siderita 1A (sid_{1A}): De color pardo claro y anaranjado claro, este último color es bastante vivo sobre los bordes, el agregado es masivo, su exfoliación es romboédrica levemente observable, presenta alto relieve, alta birrefringencia y extinción ondulante (ver Figura 25 y Figura 29)

Galena 1A (gn_{1A}): Se observa como opaco, presentándose en masas irregulares o en finas vetillas de bordes sinuosos relleno espacios entre granos (ver Figura 26, Figura 28 y Figura 30).

Cuarzo 1A (cz_{1A}): Es incoloro, de relieve medio, con hábito hexagonal y hexagonal alargado dependiendo de la dirección en la que fue cortado para la lámina y su extinción es recta en los cristales de hábito hexagonal alargado (ver Figura 25 y Figura 27).

Dolomita 1A (dol_{1A}): De color azul turquesa (por la tinción), con hábito y exfoliación romboédrica y alta birrefringencia, algunas veces se observan lamelas de macla paralelas a la diagonal mayor del rombo que forma la exfoliación (ver Figura 26, Figura 28 y Figura 29).

Calcita 1A (cal_{1A}): Incolora, con hábito desde subhedral hasta euhedral romboédrico, exfoliación romboédrica, relieve medio, alta birrefringencia y en algunos cristales presenta lamelas de macla (ver Figura 30)

Pirita 1A (py_{1A}): Es un mineral opaco que rellena tanto en forma de vetilla como en agregado masivo (Figura 31), en algunos bordes está alterando a goethita, como se puede observar en la Figura 31.

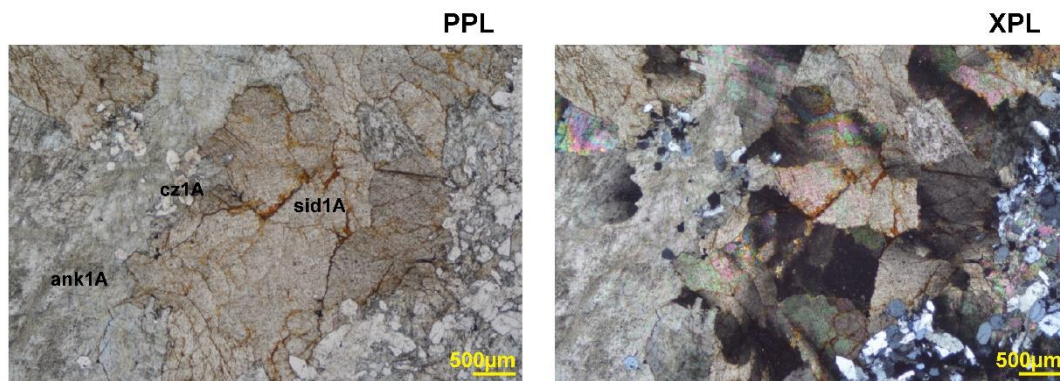


Figura 25. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando sid-ank-cz de la asociación 1A.

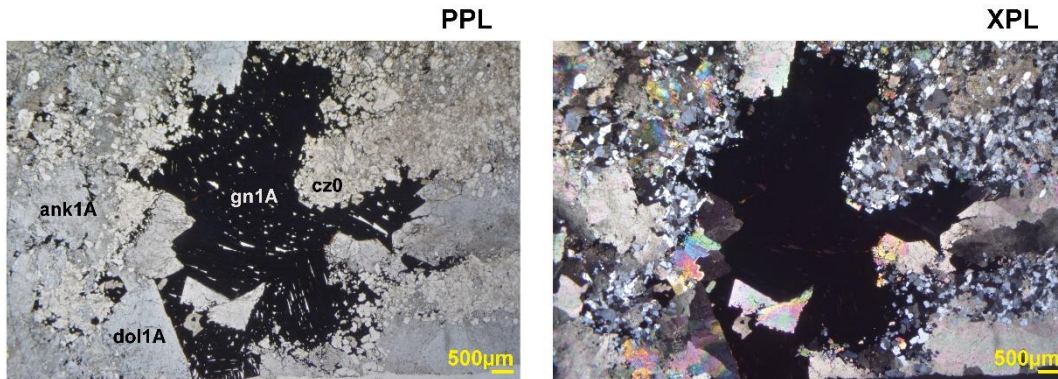


Figura 26. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando gn-ank-dol de la asociación 1A.

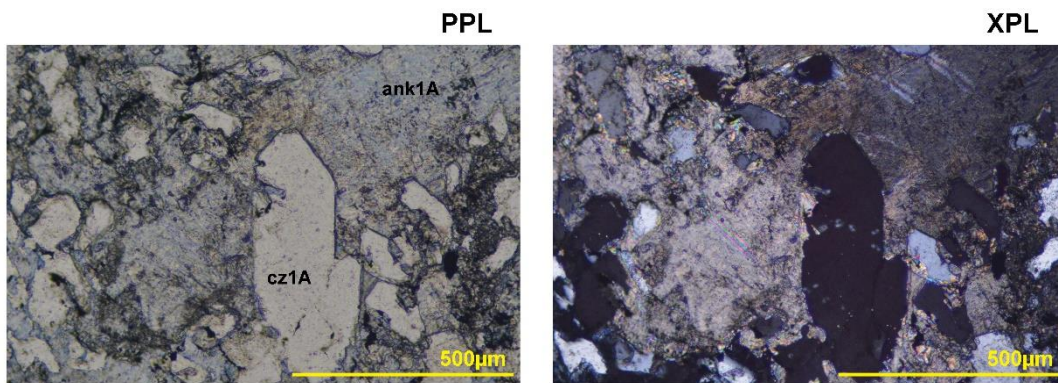


Figura 27. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando cuarzo hexagonal de la asociación 1A, con extinción recta y bordes alterados por carbonatos.

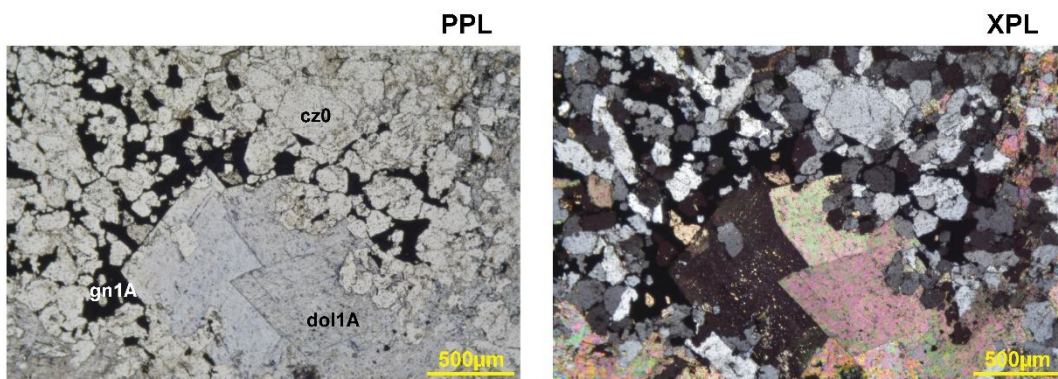


Figura 28. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando cristales romboédricos de dolomita de la asociación 1A.

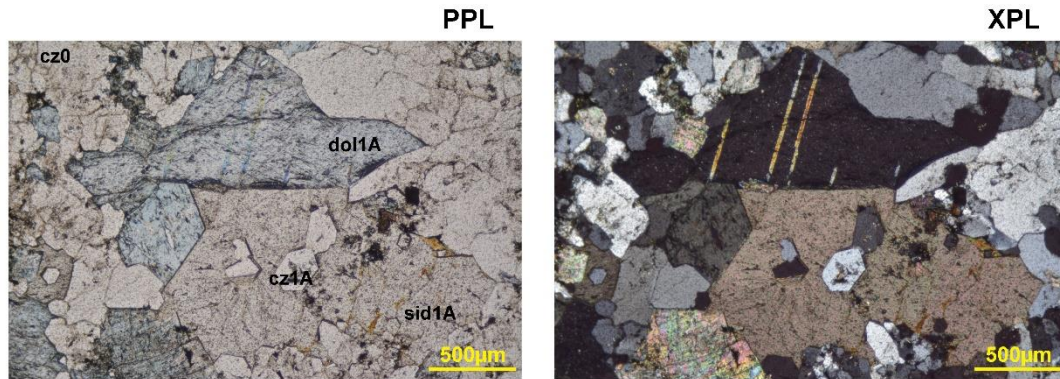


Figura 29. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando dolomita de la asociación 1A con lamelas de macla paralelas a la diagonal mayor de la exfoliación romboédrica, acompañado de siderita y cuarzo.

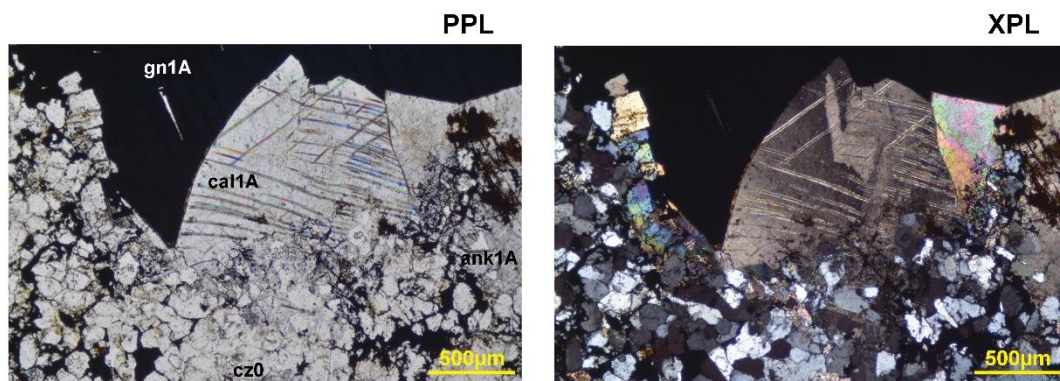


Figura 30. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando lamelas de macla en enrejado de calcita de la asociación 1A.

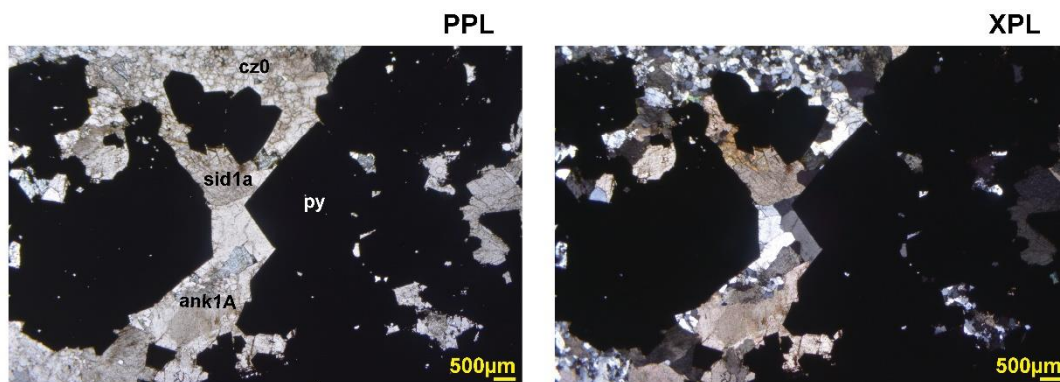


Figura 31. Fotografía tomada sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando una vetilla de pirita.

Asociación 1B. Esta asociación corresponde a minerales formados durante el segundo estadio de la etapa 1 que afectó las rocas cretácicas del pozo UBL0809 y principalmente la metasomatita. Durante esta etapa se formaron tanto cristales como agregados masivos de ankerita y cuarzo que desarrollaron texturas en drusa y de peineta propias de un enfriamiento lento, desde las paredes de la cavidad hacia el centro.

Cuarzo 1B (cz_{1B}): Es incoloro, de relieve bajo y birrefringencia de primer orden, como se puede ver en la Figura 32.

Ankerita 1B (ank_{1B}): se presenta en color entre pardo claro y turquesa azulado (debido a la tinción), no es observable la exfoliación, su relieve es alto, su birrefringencia es muy alta y frecuentemente presenta extinción ondulante (ver Figura 32 y Figura 33).

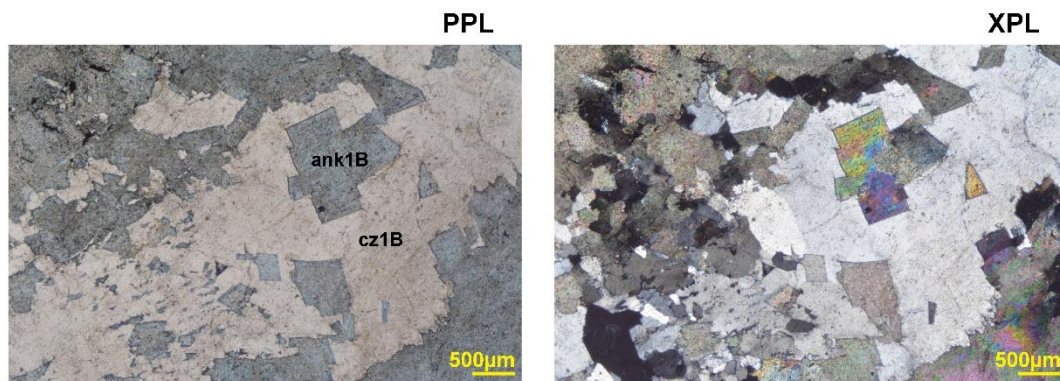


Figura 32. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L5 mostrando cz-ank de la asociación 1B.

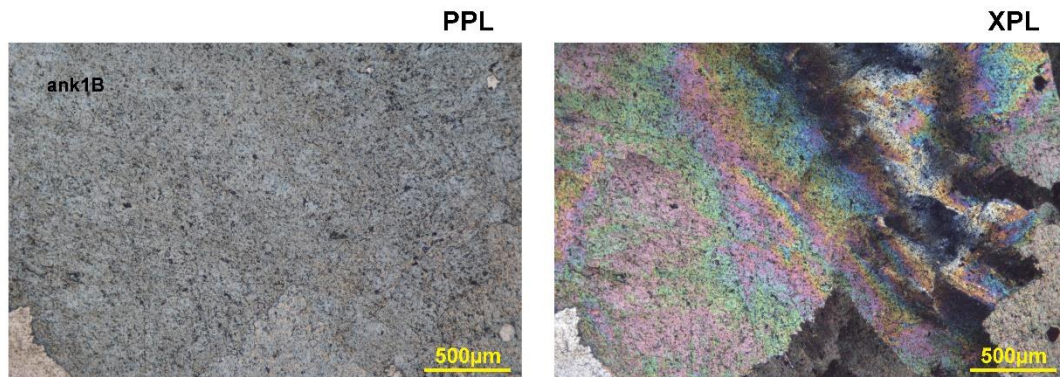


Figura 33. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L5 mostrando ankerita de la asociación 1B.

Asociación 2. La asociación 2 corresponde a vetillas de origen hidrotermal de cuarzo-ankerita-siderita±galena, de hasta un centímetro de espesor cortando la metasomatita.

Cuarzo 2 (cz₂): Es incoloro, de bajo relieve y birrefringencia de primer orden, el hábito de los cristales es elongado en dirección a las paredes de la vetilla, se constituye como el mineral más abundante de la vetilla de la asociación 2 (ver Figura 34 y Figura 35)

Ankerita 2 (ank₂): A diferencia de la ank_{1A} predomina más el color pardo claro que el turquesa azulado (por la tinción), lo cual indica un mayor contenido de Fe, no es observable la exfoliación, su relieve es moderado, su birrefringencia es alta y frecuentemente presenta extinción ondulante (ver Figura 34 y Figura 35).

Siderita 2 (sid₂): Se presenta en color entre pardo claro y anaranjado claro, el agregado es masivo, presenta alto relieve, muy alta birrefringencia y extinción ondulante (ver Figura 35).

Galena 2 (gn₂): Se observa opaco sus bordes son rectos y algunos están alterando a anglesita (ver Figura 34 y Figura 35).

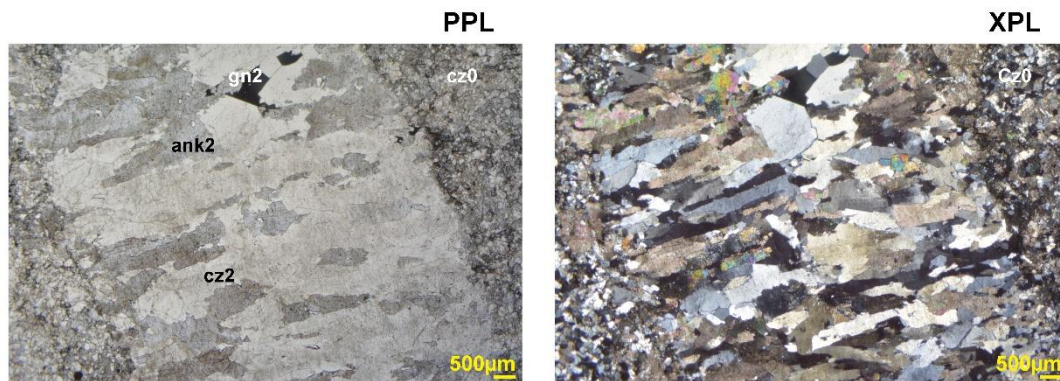


Figura 34. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L3 mostrando una vetilla de la etapa 2 con cz-ank-gn.

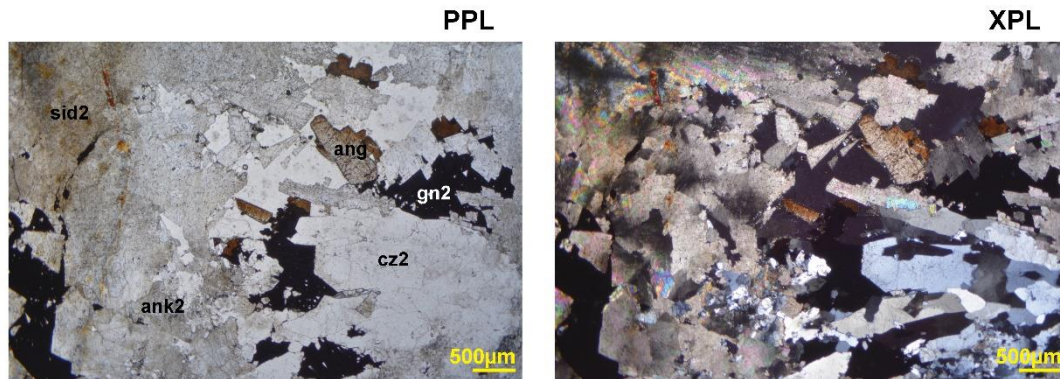


Figura 35. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L3 mostrando ang producto de alteración de gn.

Asociación 3. Esta es la última etapa de alteración, ocurre por la infiltración de fluidos enriquecidos en materia orgánica que oxidan los sulfuros y minerales de hierro formados en etapas anteriores.

Anglesita (ang): De color pardo claro, ésta se desarrolla sobre los bordes de la gn₁ y la gn₂ (ver Figura 36).

Goethita (gt): Se observa sobre los bordes de pirita, presentando un color pardo claro (ver Figura 37)

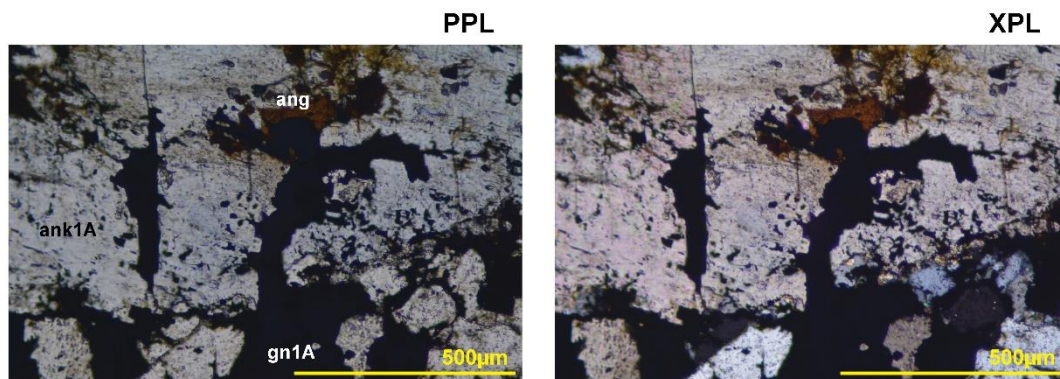


Figura 36. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L1 mostrando anglesita producto de alteración de la galena.

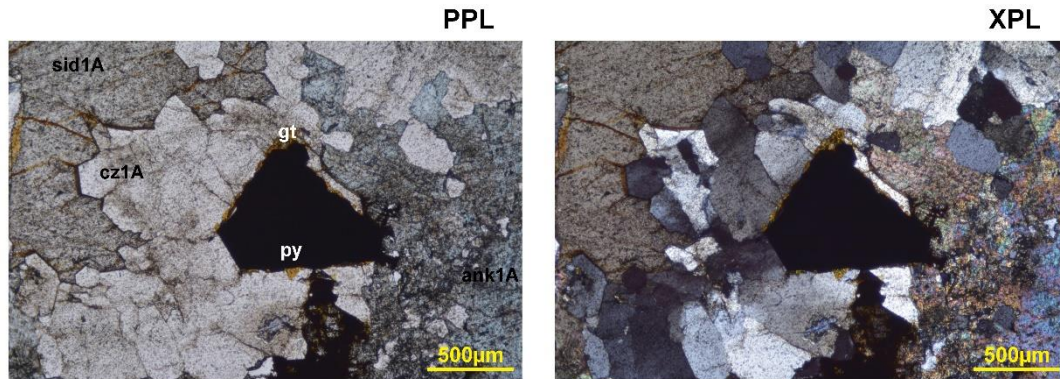


Figura 37. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L2 mostrando pirita alterando en sus bordes a goethita.

6.5. Otras observaciones en el microscopio óptico

Conglomerado. Esta es la roca de mayor extensión del pozo UBL0809, por ello se buscó ampliar su descripción composicional y textural mencionada anteriormente en muestra de mano.

Se observó que el clasto (mencionado en la descripción macroscópica como clasto de lodolita gris verdosa) tiene una composición predominantemente arcillosa, con algo de sílice y algunas micas como accesorio (ver Figura 38), éste tiene finas vetillas de pirita (observadas como opacos) en su interior, previas a la formación del conglomerado (ver Figura 39).

El cemento del conglomerado es carbonatado con presencia de abundantes partículas de sílice que llegan a medir 500 micras. Sobre dicho cemento se observó la presencia de un mineral de alteración del carbonato de color entre verde oscuro y pardo oscuro, de alto relieve y baja birrefringencia como se puede observar en la Figura 40.

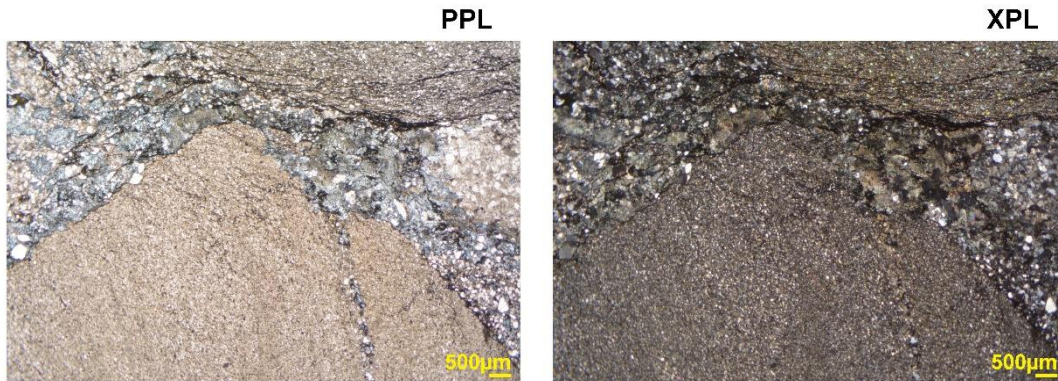


Figura 38. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando un clasto arcilloso del conglomerado.

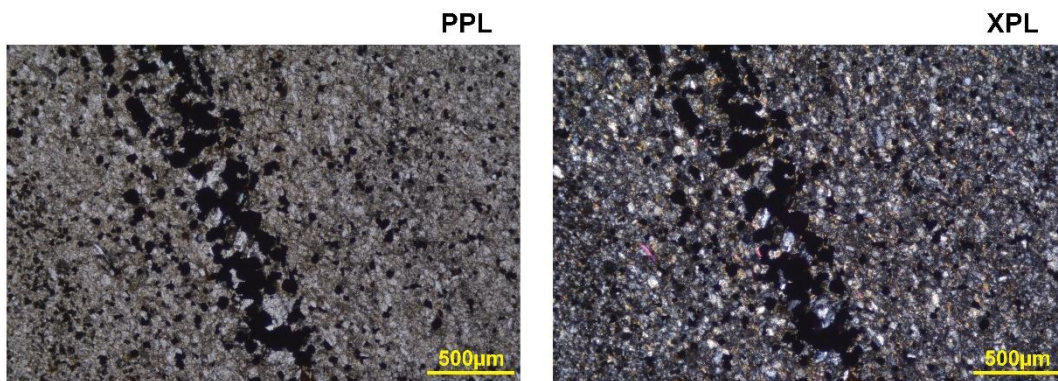


Figura 39. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando finas vetillas de pirita dentro de un clasto arcilloso del conglomerado.

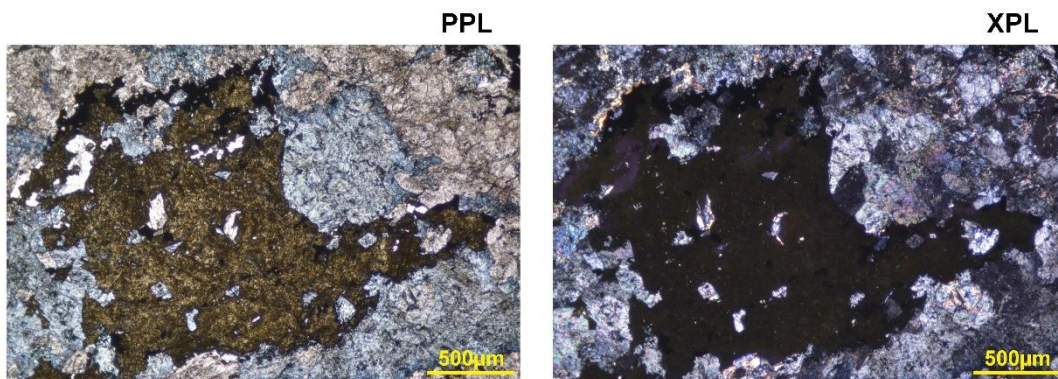


Figura 40. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L6 mostrando un carbonato de la matriz alterando.

Textura generada por procesos de presión – disolución. Se preparó la lámina pulida UBL0809-L4 para observar la textura formada por aparentes procesos de presión – disolución observados en la descripción macroscópica, a la que le tomaron fotografías de esta lámina tomadas a diferentes escalas (ver Figura 41).

Sobre la Figura 41A no se observa cemento que una los clastos de cuarzo, muy similares a los observados en la roca precursora a la mineralización, la arenisca calcárea, también, en la Figura 41C y D se evidencia como los granos de cuarzo detrítico aparentemente se desplazan (o fluyen) sobre la ank_{1A} que lo rodea.

Una interpretación propuesta para el origen de esta textura y las observaciones mencionadas, se puede leer en el capítulo de discusión.

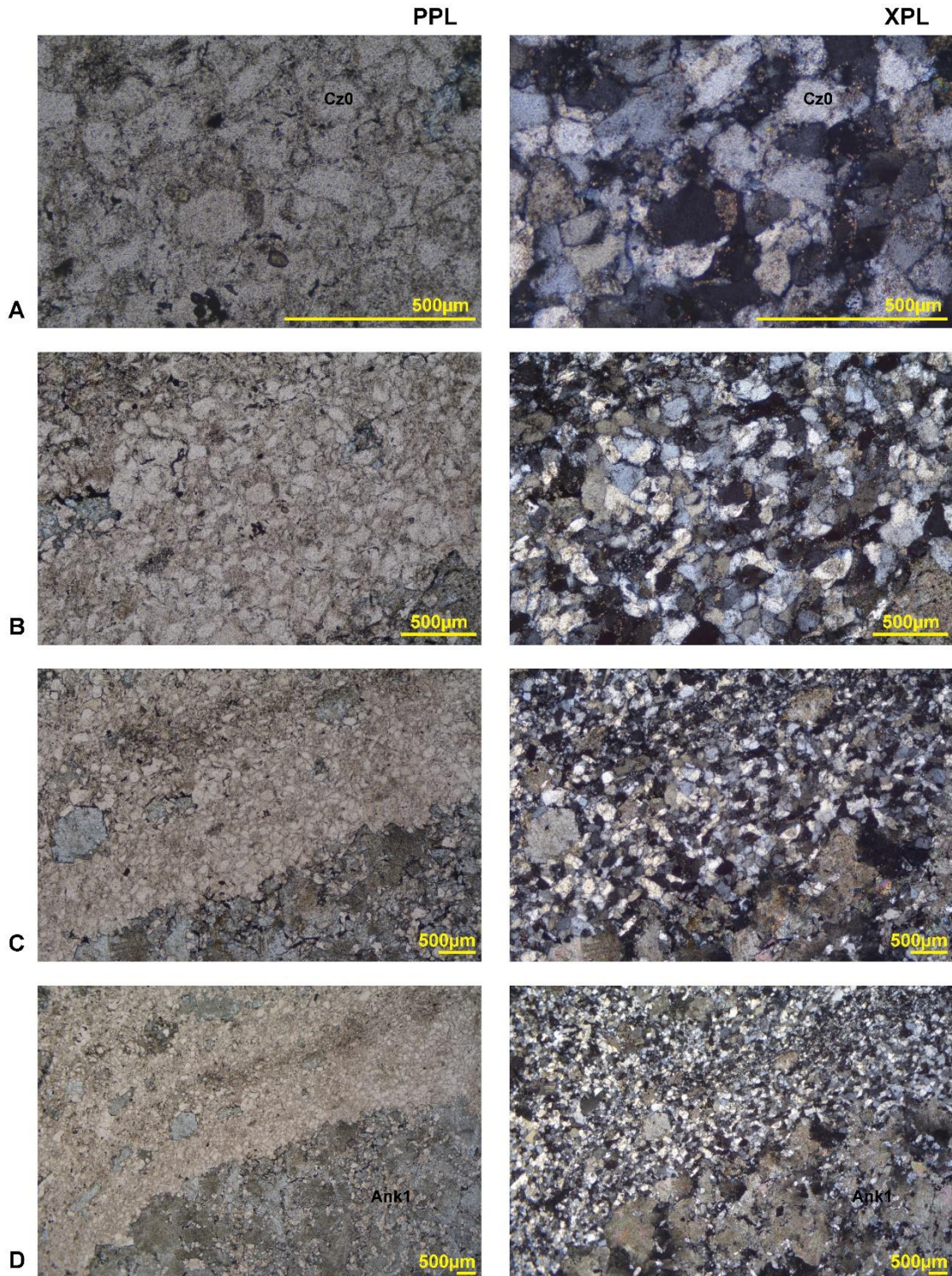


Figura 41. Fotografía sobre la lámina UBL00809-L4 mostrando la textura generada por procesos de presión – disolución.

6.6. Microscopía electrónica de barrido y espectrometría de dispersión de energía (SEM+EDS)

Se analizaron nueve puntos en el microscopio electrónico de barrido, todos sobre la lámina pulida UBL0809-L1 y correspondientes a minerales de la asociación 1, lo cual permitió corroborar minerales que no se habían definido con completa seguridad, identificar otros que no se habían observado y tener una composición química semicuantitativa del contenido de las menas Fe y Pb.

Es importante mencionar que todos los resultados mostraron contenido de carbono, que generalmente corresponden al recubrimiento de grafito aplicado durante la preparación de la muestra.

Siderita. Sobre la imagen se pueden diferenciar cuatro tonalidades de color, lo que inicialmente permite inferir cuatro composiciones distintas, la primera corresponde al punto señalado en la Figura 42 que mediante el análisis semicuantitativo de elementos del mineral mostró que los elementos principales son hierro, carbono y oxígeno, elementos que conforman la siderita; lo cual se confirma, al comparar el espectro de dispersión obtenido con los presentados por Kenneth (2004) coincidiendo con el de siderita (ver Figura 43).

La siderita es la principal mena de Fe para este depósito, pues contiene un 50 Wt% de Fe sobre su contenido de elementos total.

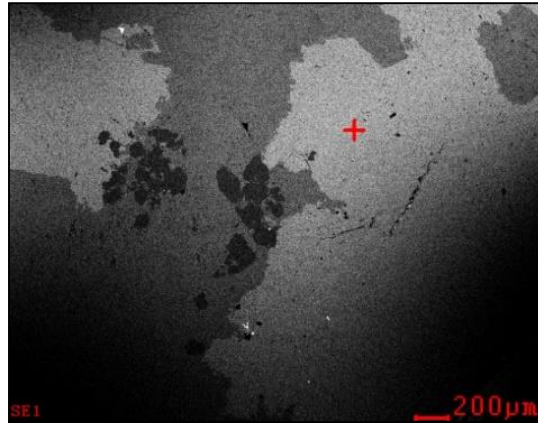


Figura 42. Imagen de electrones secundarios para la siderita.

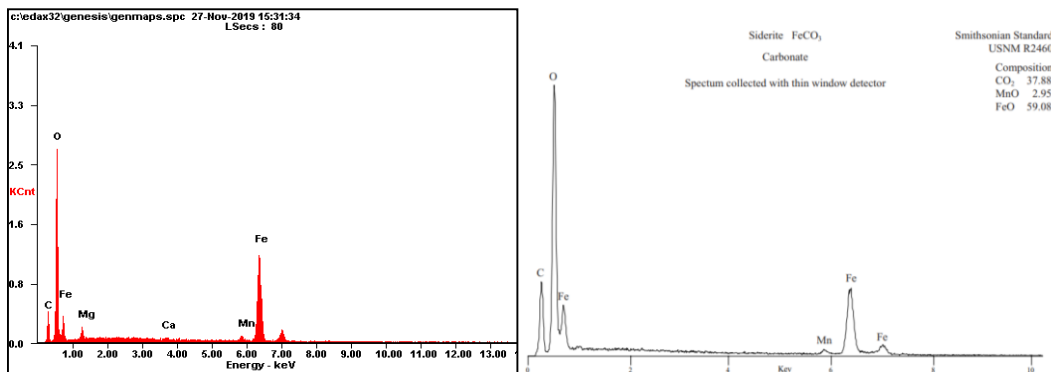


Figura 43. Comparación de los espectros de dispersión para la siderita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).

Ankerita. En el punto señalado en la Figura 44 se obtuvo el análisis semicuantitativo de elementos del mineral en el que se identificaron como principales elementos el calcio, carbono, oxígeno, hierro, magnesio y manganeso, elementos que presenta la ankerita. Cabe destacar que el porcentaje de magnesio presente entre el total de la suma de magnesio + hierro es de 16%, lo cual permite descartar la dolomita ferrosa (en la que este porcentaje debe superar el 50%), además, el espectro de dispersión fue comparado con los presentados por Kenneth (2004) coincidiendo con el de ankerita (ver Figura 45).

La ankerita es una mena de Fe de escasa riqueza para este depósito, pues contiene tan solo un 21 Wt% de Fe sobre su contenido de elementos total.

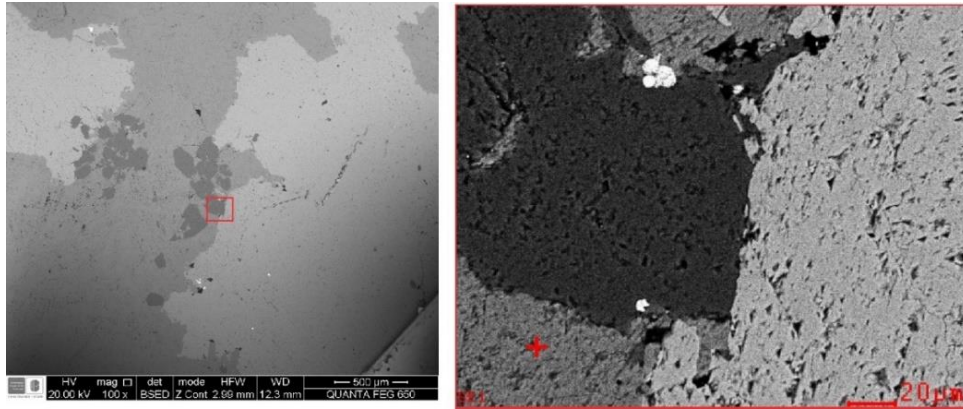


Figura 44. Imagen de electrones secundarios para la ankerita.

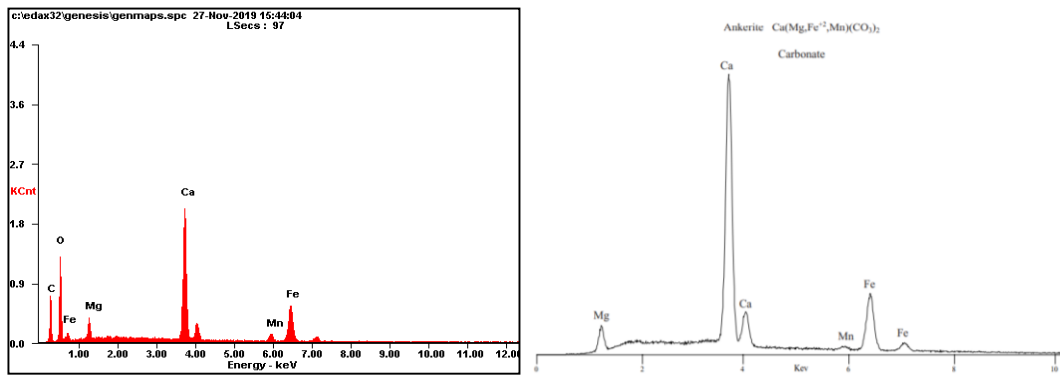


Figura 45. Comparación de los espectros de dispersión para la ankerita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).

Cuarzo. En el punto señalado en la Figura 46 sobre el mineral con habito hexagonal alargado se obtuvo un análisis semicuantitativo de elementos en el que se identificó silicio, oxígeno y carbono, excluyendo el carbono por los motivos ya mencionados, quedando los elementos que componen al cuarzo, además, el espectro de dispersión fue comparado con los presentados por Kenneth (2004) coincidiendo con el del cuarzo (ver Figura 47).

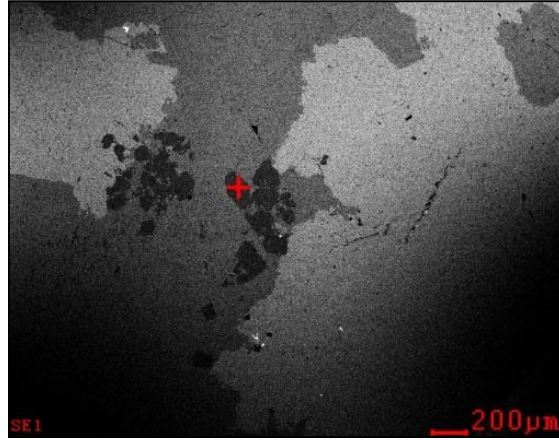


Figura 46. Imagen de electrones secundarios para el cuarzo.

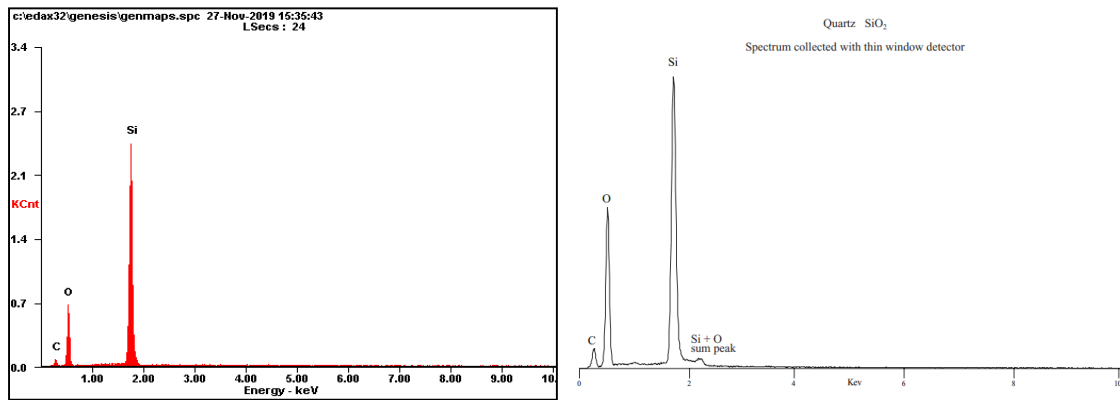


Figura 47. Comparación de los espectros de dispersión para el cuarzo. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).

Pirita. En el punto señalado en la Figura 48 sobre el mineral de color blanco, el cual se encuentra como traza, se obtuvo un análisis semicuantitativo de elementos en el que se identificó azufre, hierro, oxígeno y carbono. El azufre y el hierro son los elementos principales de la pirita, el contenido de oxígeno es muy bajo (3.9 Wt%) y posiblemente sea causado por una leve oxidación; lo anterior se confirma al comparar el espectro de dispersión con los presentados por Kenneth (2004) coincidiendo con el de la pirita (ver Figura 49).

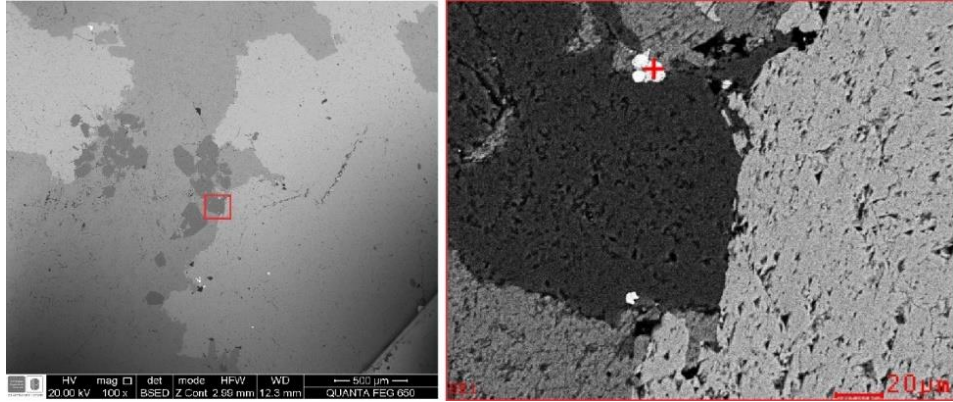


Figura 48. Imagen de electrones secundarios para la pirita.

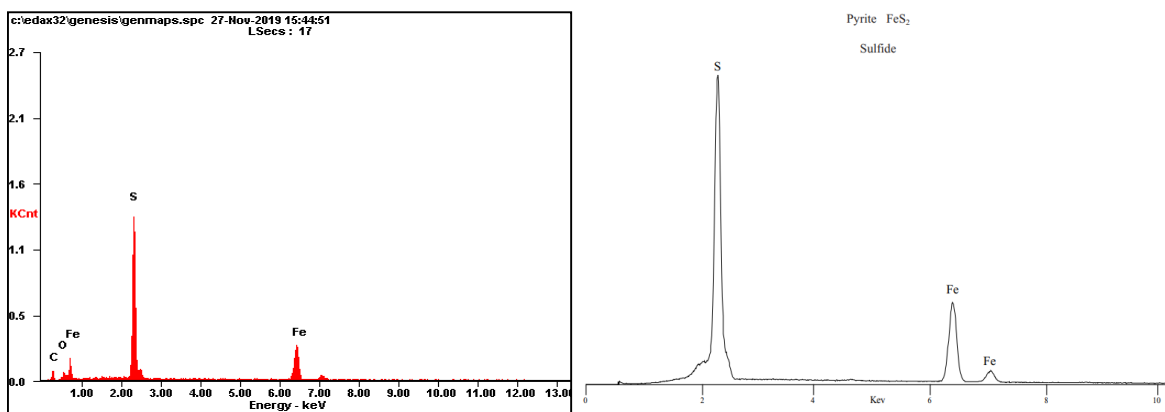


Figura 49. Comparación de los espectros de dispersión para la pirita. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).

Galena. En el punto señalado en la Figura 50 sobre el mineral de color blanco el análisis semicuantitativo de elementos muestra contenidos de azufre, plomo, cromo y carbono. El azufre y el plomo son los elementos que componen la galena, sin embargo, las trazas de cromo son un elemento anómalo, por lo cual la verificación de que el mineral analizado es galena se logró comparando el espectro de dispersión con los presentados por Kenneth (2004) (ver Figura 51).

La galena es la mena de Pb para este depósito, la cual contiene un 65 Wt% de Pb sobre su contenido de elementos total.

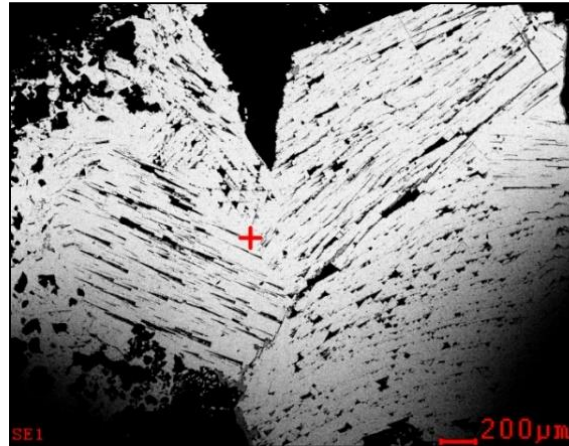


Figura 50. Imagen de electrones secundarios para la galena.

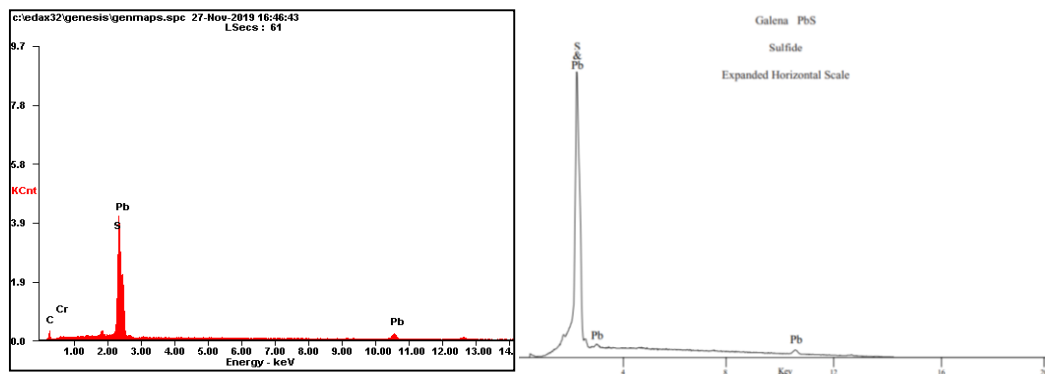


Figura 51. Comparación de los espectros de dispersión para la galena. A la izquierda el obtenido de la muestra y a la derecha el tomado de Kenneth (2004).

Anglesita. En la Figura 52 sobre el punto rojo de análisis se observa un cambio de color y relieve sobre un borde de galena, el cual arrojó en el análisis semicuantitativo de elementos azufre, plomo, oxígeno, carbono y flúor. El azufre, el plomo y el oxígeno son elementos que componen a la anglesita, el cual es un mineral producto de alteración de la galena, que para este caso se ubica sobre su borde. El contenido de flúor es anómalo.

En la Figura 53 se puede observar el espectro de dispersión obtenido para la anglesita que no aparece caracterizado por Kenneth (2004).

La anglesita presentó un contenido de Pb más alto que el de la galena (72.6 % Wt), sin embargo, sobre el núcleo no fue tan frecuente su presencia.

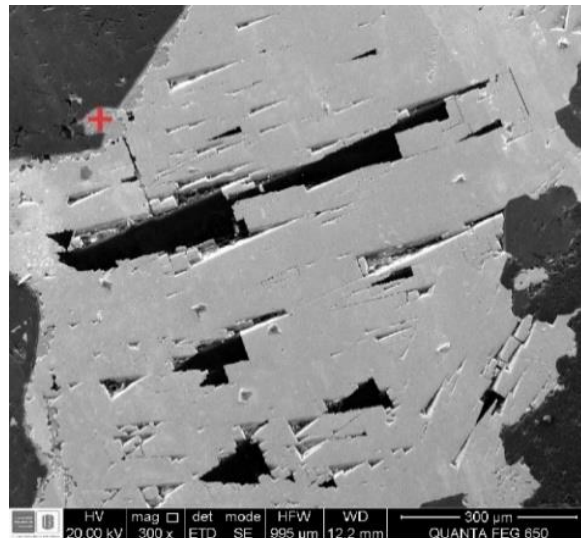


Figura 52. Imagen de electrones secundarios para la anglesita.

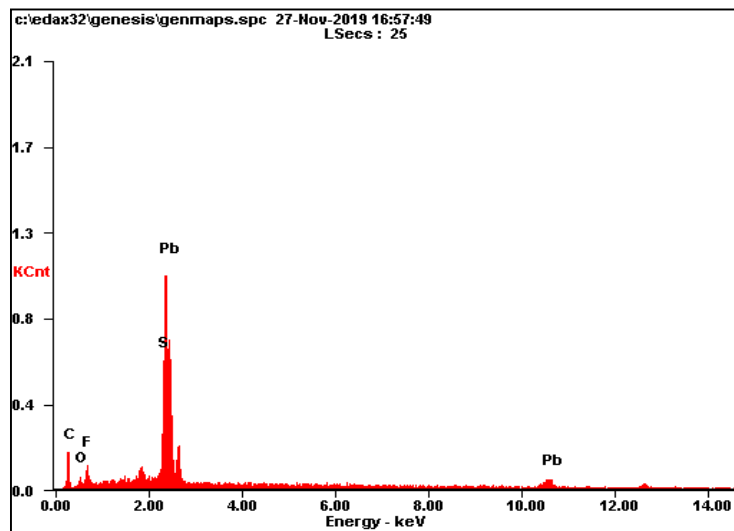


Figura 53. Espectro de dispersión de la anglesita.

Materia orgánica. El punto señalado en la Figura 54 está rodeado por cuarzo (gris oscuro) y siderita (gris claro); sobre éste se obtuvo el análisis semicuantitativo de elementos que señaló que el carbono representa el 61.72 Wt% de la muestra, acompañado de oxígeno, sodio, magnesio,

aluminio, silicio, azufre, cloro, potasio, hierro y calcio, por lo cual se clasificó este punto como materia orgánica, la cual estaba contenida en el fluido hidrotermal de la etapa 1A. El espectro de dispersión para la materia orgánica se observa en la Figura 55.

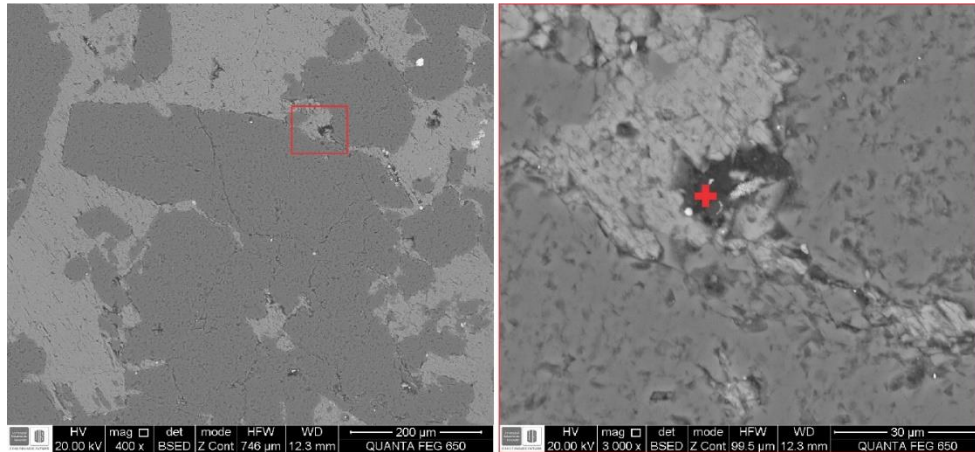


Figura 54. Imagen de electrones secundarios para la materia orgánica.

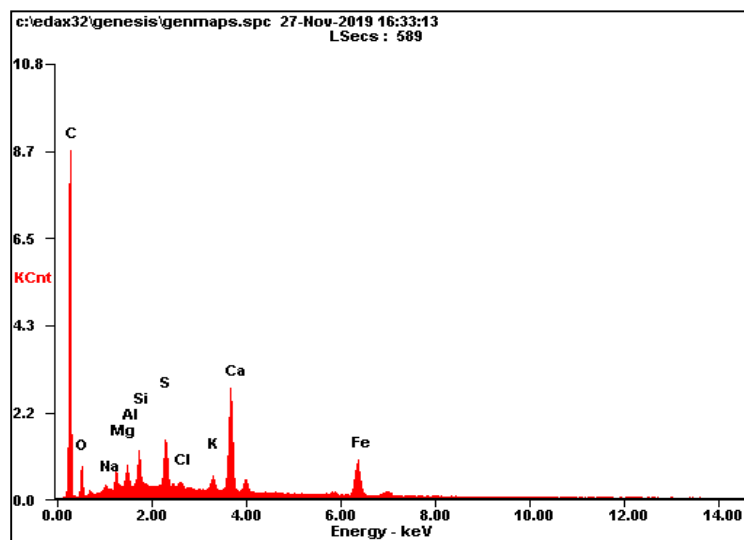


Figura 55. Espectro de dispersión para la materia orgánica.

Otros elementos metálicos. El punto blanco señalado en la Figura 56 es rodeado por cuarzo, este punto blanco arrojó en el análisis semicuantitativo de elementos que está compuesto

principalmente por los metales hierro, cobalto, níquel, el metaloide arsénico y por oxígeno, los cuales muestran el espectro de dispersión observado en la Figura 57.

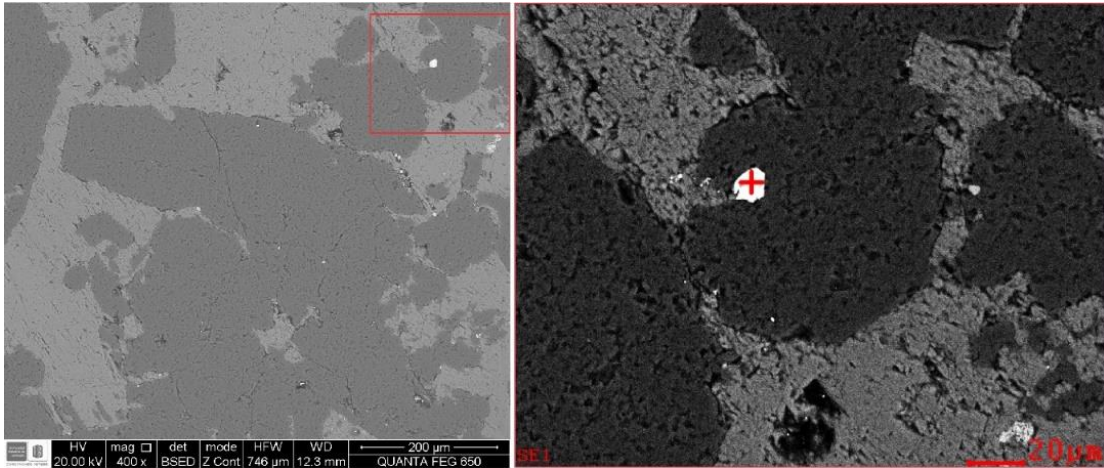


Figura 56. Imagen de electrones secundarios sobre un punto con elementos metálicos.

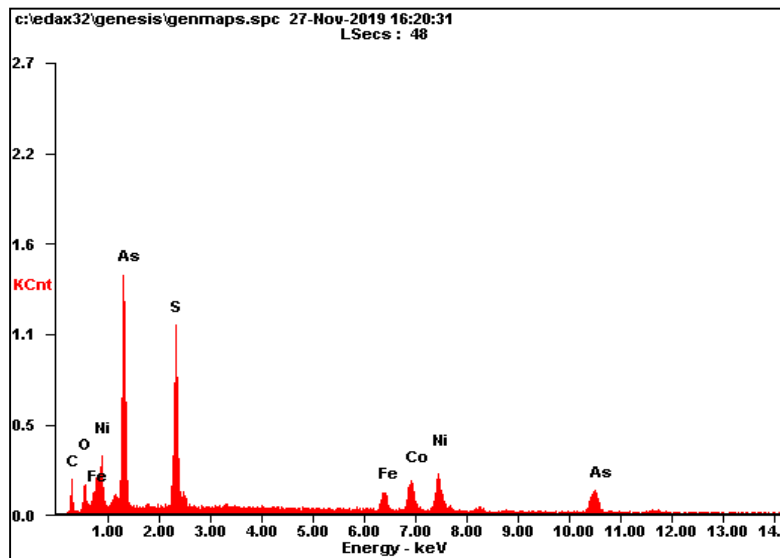


Figura 57. Espectro de dispersión sobre punto con elementos metálicos.

6.7. Difracción de rayos X (DRX)

Se sometieron cuatro muestras a DRX, éstas fueron tomadas sobre los testigos de las láminas pulidas (ver Figura 7) y los gráficos interpretados fueron obtenidos con el software DIFFRAC.EVA.

Galena. Este resultado proviene de una muestra molida del testigo de la lámina pulida UBL0809-L1, que fue tomada sobre un agregado de galena en bolsas de la asociación 1. Con el resultado obtenido en la Figura 58 se puede comprobar que el mineral allí presente es galena y el cuarzo que aparece es debido a que en el proceso de extracción de la muestra se pudo colar algún mineral aledaño de la roca.

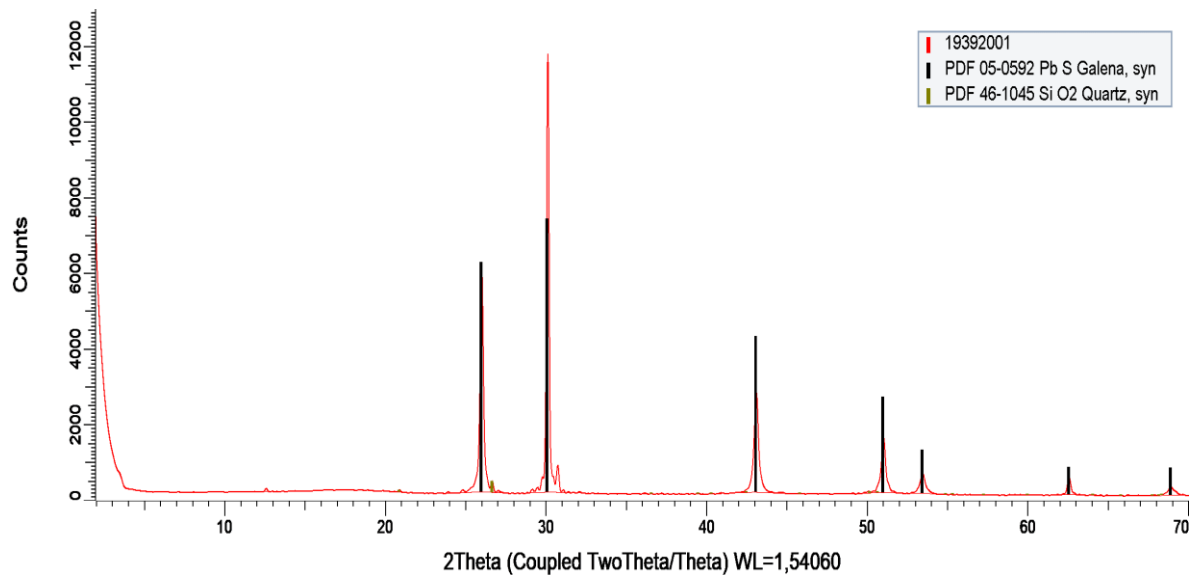


Figura 58. Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L1-DRX1.

Pirita, siderita, cuarzo y goethita. Este resultado que proviene de una muestra de roca molida tomada sobre un agregado de pirita, permitió comprobar que el mineral previamente identificado

es pirita, además aparece el óxido gohetita cuyo origen probablemente sea de alteración, la siderita y el cuarzo son debidos a que en el proceso de extracción de la muestra se pudo filtrar algún mineral aledaño de la roca (ver Figura 59).

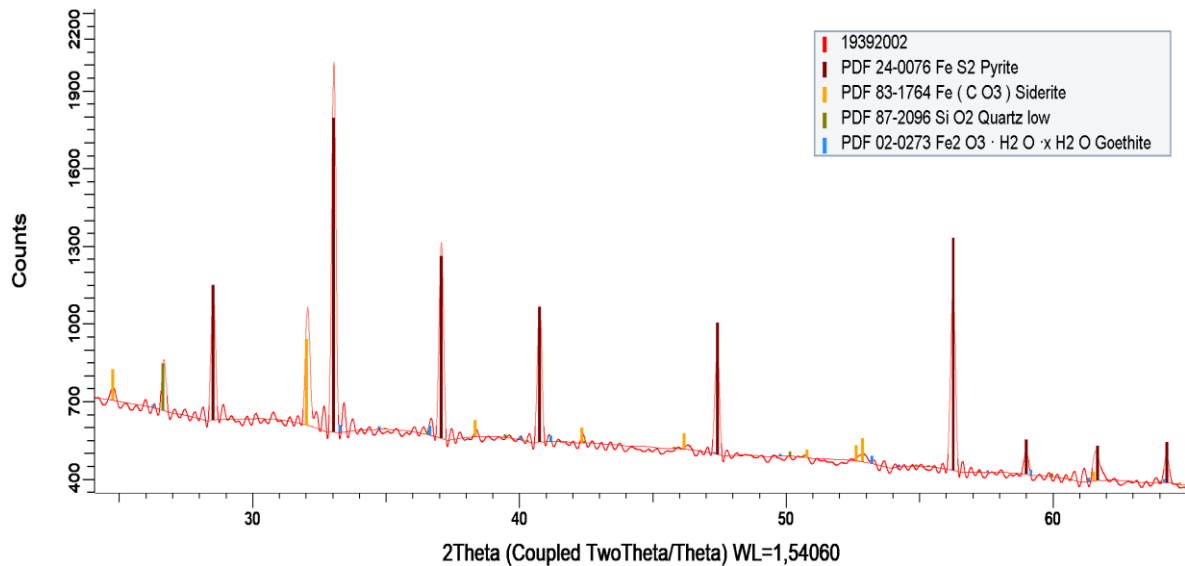


Figura 59. Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L2-DRX1.

Ankerita, cuarzo, galena. Este resultado proviene de una muestra de roca molida tomada de una vetilla de la asociación 2, la cual permitió comprobar la presencia de ankerita y cuarzo sobre esta vetilla. Adicionalmente, se muestra que la galena de esta asociación contiene óxidos de bismuto (ver Figura 60).

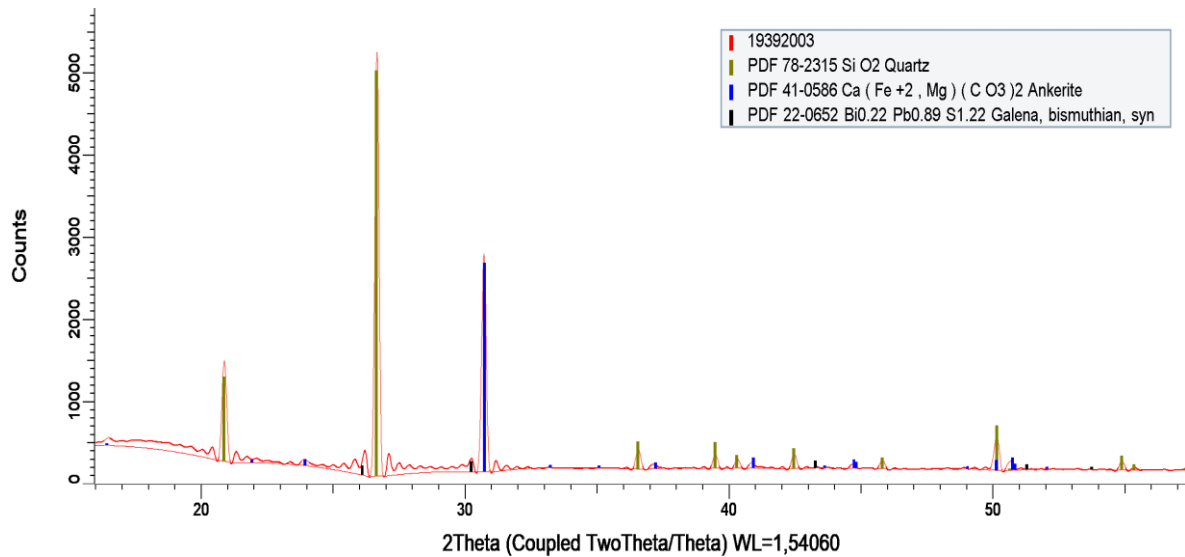


Figura 60. Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L3-DRX1.

Ankerita-cuarzo. Este resultado proviene de una muestra de roca molida tomada de un relleno hidrotermal de la asociación 1B, la cual evidencia que esta asociación efectivamente solo está compuesta por ankerita y cuarzo (ver Figura 61).

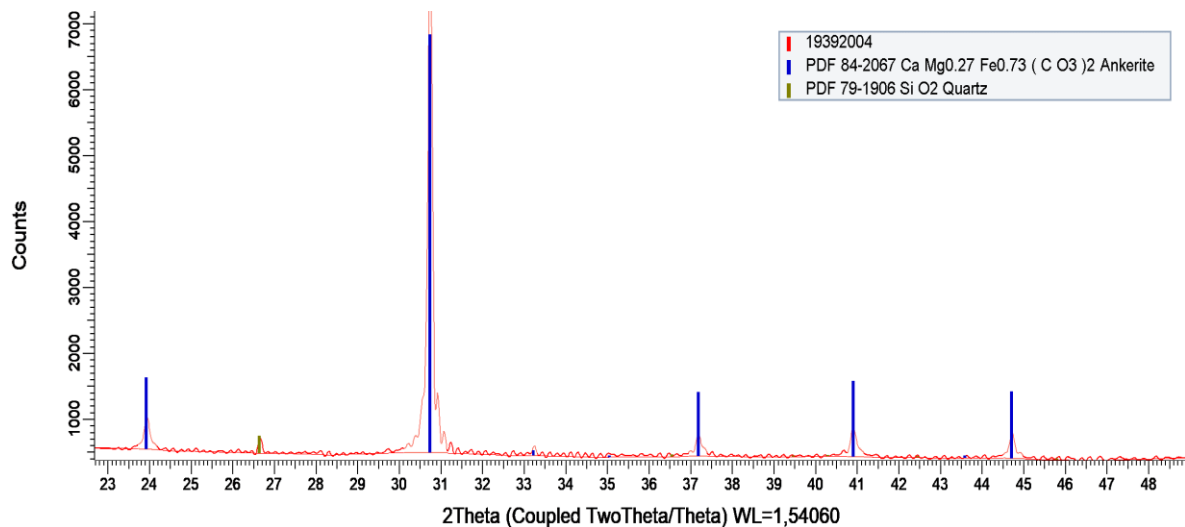


Figura 61. Gráfica interpretativa obtenida por medio del software DIFFRAC.EVA para los resultados de la muestra UBL0809-L5-DRX1.

6.8. Historia hidrotermal

Fluidos hidrotermales de origen connato circularon por la porosidad primaria y secundaria de una roca conglomerática, dejando leves rastros de su paso al precipitar carbonatos y galena en bajas proporciones, sin embargo, la mayor interacción ocurrió cuando dicho fluido entró en contacto con la arenisca calcárea, provocando un metasomatismo que disolvió la textura original de la roca y reemplazó su composición por la asociación de carbonatos y sulfuros menas de Pb-Fe. Esta unidad metasomática sufrió tres etapas hidrotermales que se describen a continuación:

La etapa 1 se dividió en dos estadios (A y B) que sucedieron a partir de un mismo fluido con condiciones de precipitación y crecimiento de cristales distintas, lo que generó diferencias texturales.

La etapa 1A es la más importante desde el punto de vista metalogénico, pues en ella precipitaron de forma diseminada y algunas veces en bolsadas la mena de Pb-Fe (galena-siderita-ankerita) la cual viene acompañada en menor cantidad por otros minerales ganga como cuarzo, dolomita, calcita, pirita y calcopirita. Aquí, el fluido hidrotermal provocó un remplazamiento mineral y textural pervasivo en la arenisca calcárea, disolviendo su cemento, junto con los minerales originales de la roca, precipitando sílice sobre los bordes de los granos de cuarzo de la arenisca, obliterando la textura original y formando ahora una roca fuertemente consolidada, poco porosa y bastante densa, a la que se propone renombrar como metasomatita ankerita-siderita-galena.

Durante la etapa 1B el fluido hidrotermal precipita sobre cavidades de la arenisca calcárea de uno a varios centímetros de espesor que proporcionan a diferencia de la etapa 1A un enfriamiento más lento y un mayor espacio para formar minerales con perfecto habito euhedral en texturas en

drusa y en peineta indicativas de un enfriamiento cada vez más lento desde las paredes de la cavidad hacia el centro, formando ankerita y cuarzo en proporciones mayores que la etapa anterior.

Seguidamente, en la etapa 2 interactúa un segundo fluido rico en sílice y de origen connato que precipita los minerales cuarzo, ankerita, siderita y más o menos galena, formando vetillas de bordes rectos y hasta un centímetro de ancho que atraviesan la arenisca calcárea.

Finalmente, en la etapa 3, ocurre una alteración supérgena por fluidos enriquecidos en materia orgánica que producen una capa superficial de limonita-gossan y más profundamente en el núcleo genera oxidación de sulfuros y minerales de hierro.

6.9. Paragénesis mineral

Se identificaron tres etapas principales y la primera de estas fue dividida en dos estadios; de modo que la paragénesis mineral presentada para los fluidos hidrotermales que interactuaron con las rocas cretácicas perforadas en el pozo UBL0809 consistieron de cuatro asociaciones precipitadas en el siguiente orden (ver Figura 62):

- Asociación IA: $ank_{IA}-sid_{IA}-gn_{IA}-cz_{IA}-dol_{IA}-cal_{IA}-py_{IA}-cpy_{IA}$
- Asociación IB: $ank_{IB}-cz_{IB}$
- Asociación 2: $cz_2-ank_2-gn_2$
- Asociación 3: $ang-mlq-gt-hem$

t →

ETAPA MINERAL	1		2 (Vetillas)	Etapa 3 (alteración supérgena)
	A (fomación mena Pb-Fe)	B (cristalización euhedral)		
Mena				
Galena	█			
Ankerita	█			
Siderita	█			
Anglesita				█
Goethita				█
Hematita				█
Ganga				
Cuarzo	█			
Dolomita	█			
Calcita	█			
Calcopirita	█			
Pirita	█			
Malaquita				█

Figura 62. Secuencia paragénetica de los minerales hidrotermales que interactuaron con rocas cretácicas perforadas en el pozo UBL0809

7. Discusión

7.1. Similitudes del depósito Pb-Fe con los Mississippi Valley Type (MVT)

Considerando los distintos tipos de depósitos de plomo en rocas sedimentarias, se concluye que la mayor cantidad de similitudes se tiene con los MVT, por ello, en los siguientes párrafos se dan argumentos sobre la presencia de este tipo de depósito en las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental.

Los principales minerales precipitados en las rocas cretácicas perforadas en el núcleo objeto de estudio son carbonatos y sulfuros de plomo, minerales comunes reportados para los MVT y además, éstos son de origen posterior a los procesos sedimentarios de formación de la roca huésped, cumpliendo con el carácter epigenético de éste tipo de mineralización (Tritlla, y otros, 2006).

Por otro lado, los MVT suelen presentarse dentro de un horizonte estratigráfico específico (estratoligado), no necesariamente como capas concordantes, que, para el caso de las sedimentitas perforadas en el pozo objeto de estudio, se encuentran confinadas en la última capa de arenisca calcárea; éste tipo de rocas carbonatadas son las hospedadores más comunes de éstos depósitos (Leach, Taylor, Fey, Diehl, & Saluts, 2010).

Otra característica de los depósitos MVT es que suelen estar formados por un número elevado de depósitos de pequeño tonelaje (Tritlla, y otros, 2006) sin una extensa continuidad lateral, que para el pozo de perforación UBL0809 corresponde a nueve metros verticales de mineralización diseminada, pero que parece replicarse en otros puntos, como lo reportan Lopez (1953) y Suarez

(1943) en lugares distintos pero cercanos (unos kilómetros) al del pozo estudiado en esta investigación.

El factor más importante de los MVT es que éstos no tienen relación genética con litologías ígneas (Tritlla, y otros, 2006), cuestión bastante probable para la mineralización estudiada en esta investigación, pues sobre el CEOR, región de la que hace parte la Fm. Ubalá (hospeda la mineralización), no se reporta actividad ígnea. En consecuencia y descartando las litologías ígneas, es probable que los fluidos hidrotermales provengan de aguas connatas.

Por último, el pozo UBL0809 fue extraído sobre el CEOR y aunque se esté tratando de mineralizaciones distintas a las que formaron las esmeraldas, es posible que procesos similares hubiesen ocurrido, como lo consideró Ottaway (1991) quien afirmó que los procesos responsables de la formación de los depósitos MVT son muy similares a los que formaron las esmeraldas en Muzo.

7.2. El rol de la presión–disolución en el depósito

Aunque los procesos presión – disolución son generalmente asociados a distintas fases de la diagénesis, algunas observaciones realizadas sobre núcleos del pozo de perforación UBL0809 parecen indicar que en este caso ocurrieron relacionados a los procesos de mineralización. Por ejemplo, los frecuentes estilolitos ubicados sobre bordes de ankerita permiten señalar que el proceso de disolución responsable de los estilolitos se detuvo al contacto con dicho mineral epigenético, indicando entonces, que los estilolitos y el hidrotermalismo fueron simultáneos o que los estilolitos se formaron posteriormente a la mineralización. Por otro lado, las texturas de presión disolución observadas en muestra de mano y en el microscopio óptico, parecen indicar que fluidos

ricos en cuarzo se desplazaron y precipitaron sobre carbonatos epigenéticos que no se disolvieron, lo cual formó las superficies de estilolitos sobre dichos carbonatos.

Al momento de culminar este informe no encontramos una explicación de la relación de los procesos de presión-disolución con los procesos de mineralización, sin embargo, se postulan las siguientes hipótesis:

Los estilolitos y algunas las texturas de precipitación indican procesos de presión-disolución.

Los procesos de presión-disolución ocurrieron simultáneamente o posteriores a la mineralización.

Si estos procesos de presión-disolución fueron simultáneos a la mineralización pueden ser causantes de las cavidades en que se formaron los minerales de la etapa hidrotermal 1B.

8. Conclusiones

El pozo de perforación UBL0809 pertenece a la Formación Ubalá compuesto por las siguientes litologías de base a tope: roca conglomerática que se intercala hacia la base con lodolitas y hacia el tope con una fina capa de yeso acicular, seguidas por una capa de 2.7 m de caliza wackestone de bivalvos, metasomatita ankerita-siderita-galena y la capa más superficial del pozo conformada por limonita-gossan.

Las rocas de edad cretácica de la cordillera oriental perforadas en el núcleo UBL0809 contienen una mineralización de nueve metros de Pb-Fe en galena y siderita, respectivamente.

La paragénesis mineral presentada para los fluidos hidrotermales que interactuaron con rocas perforadas en el pozo UBL0809 se formó en tres etapas principales y la primera de estas se dividió en dos estadios; de modo que consiste de cuatro asociaciones formadas en el siguiente orden:

Asociación 1A: ankerita-siderita-galena-cuarzo-dolomita-calcita-pirita y calcopirita.

Asociación 1B: ankerita-cuarzo

Asociación 2: cuarzo-ankerita-siderita-galena

Asociación 3: anglesita-malaquita-goethita-hematita

Existen similitudes composicionales, estratigráficas, dimensionales y litológicas entre el depósito Pb-Fe descrito en las sedimentitas cretácicas de la Fm. Ubalá y los depósitos Mississippi Valley Type reportados en la bibliografía especializada.

Recomendaciones

Realizar estudios para determinar los procesos físico-químicos que sucedieron en la interacción de los fluidos y la roca hospedadora de la mineralización.

Llevar a cabo una campaña de campo para cartografiar la mineralización mena de Pb-Fe y determinar los controles (estructurales, litológicos) que permitieron su precipitación.

Estimar un cálculo de reservas para determinar si las concentraciones de Pb y/o Fe son explotables.

Aprovechar los recursos de la Litoteca Nacional para realizar más proyectos de investigación como éste.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Ubalá. (2004). *Plan de Desarrollo Municipal - Ubalá. 2004 - 2007*. Ubalá: Alcaldía de Ubalá.
- Alzate, L., Calderón, J., Caicedo, J., & Pinzón, H. (2013). *Exploración y caracterización de azufre en el sector de Gachalá - Gachetá en el departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Baccelle, L., & Bosellini, A. (1965). *Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocche sedimentarie*. Annali dell'Università di Ferrara (Nuova Serie). Sezione IX, Scienze geologiche e paleontologiche, Vol. 1, N° 3, 59-62, 15 Pls.
- Cruz, J., & Camacho, R. (1971). *Informe sobre las investigaciones geológico - mineras en el Yacimiento de Hierro de Ubalá. Cundinamarca*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Dunham, R. (1962). *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*. Houston.
- Garzón, A. (1975). *Prospección geoquímica en suelos en Ubalá, Cueva Oscura y río Farallones, región del Guavio*. Bogotá: INGEOMINAS.
- IUGS. (2006). *Metasomatism and metasomatic rocks*. En V. Zharikov, N. Pertsev, V. Rusinov, E. Callegari, & D. Fettes, *Metasomatism and metasomatic rocks* (pág. 17). Moscow: Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks.
- Kenneth, S. (2004). *Energy Dispersive Spectrometry of common rock forming minerals*. Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- Leach, D., Taylor, R., Fey, D., Diehl, S., & Saluts, R. (2010). *Mineral Deposit Models for Resource Assessment. U.S. Geological Survey*, 64.

- Lopez, J. (1953). *Informe sobre los minerales de plomo y zinc, motivo de las propuestas números 591, 592, 628 y 630, en los municipios de Ubalá, Gachalá y Gama, departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Ministerio de Minas y Petróleos. Instituto Geológico Nacional.
- Mackenzie, W., & Guilford, C. (s.f.). *Atlas de petrografía Minerales formadores de rocas en lámina delgada*. Zaragoza: MASSON, S.A.
- Mendoza, H. (1983). *Mineralización de Pb-Zn en sedimentitas de la Cordillera Oriental. Región de Montenegro*. Bucaramanga: INGEOMINAS.
- Ottaway, T. (1991). *The geochemistry of the Muzo emerald deposit, Colombia*. Toronto: Terri Louise Ottaway.
- Rojas, S. (2002). *Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y zinc*. Bucaramanga: Boletín de Geoloía.
- Sarmiento. (2002). *Condiciones geológicas favorables de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos exhalativos submarinos de plomo y zinc*. *Boletín de Geología*, 49-72.
- Silva, A., Mantilla, L., & Terraza, R. (2010). *Clasificación química y geotermometría de las cloritas de las formaciones cretácicas Santa Rosa y Lutitas de Macanal, Cinturón Esmeraldífero Oriental, Cordillera Oriental, Colombia*. *Boletín de Geología*, 10.
- Suarez, V. (1943). *Reconocimiento geológico de la región del Guavio, Gachalá*. Bogotá: Ministerio de Minas y Petróleos Servicio Tecnico.
- Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., Fúquen, J., & Etayo, F. (2008). *Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental Planchas 210, 228 y 229*. Bogotá: INGEOMINAS.

Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., Fúquen, J., Torres, E., . . . Nivia, A. (2013).

Geología de la Plancha 229 - Gachalá. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Tritlla, J., Levresse, G., Corona, R., Banks, D., Lamadrid, H., & Bourdet, J. (2006). Depósitos de

Pb-Zn-Cu-Ba-F-Sr epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos de tipo "Mississippi Valley" (MVT) y similares en México.

Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 103-139.

Villamil, T. (1988). *Estudio del potencial bioestratigráfico de tres especies de trigonia del*

Cretácico inferior de Colombia. Bogotá: Tesis de pregrado del departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.